

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO

PEDRO VITOR SOUSA RIBEIRO

**SISTEMAS AVANÇADOS EM ILUMINAÇÃO NATURAL: ANÁLISE DA
INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO URBANA NA APLICAÇÃO DO
PAINEL DE CORTE A LASER EM MACEIÓ**

Maceió

2017

PEDRO VÍTOR SOUSA RIBEIRO

**SISTEMAS AVANÇADOS EM ILUMINAÇÃO NATURAL: ANÁLISE DA
INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO URBANA NA APLICAÇÃO DO
PAINEL DE CORTE A LASER EM MACEIÓ**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

Maceió

2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

R484s Ribeiro, Pedro Vitor Sousa.

Sistemas avançados em iluminação natural: análise da influência da configuração urbana na aplicação do painel de corte a laser em Maceió / Pedro Vitor Sousa Ribeiro. – 2017.

145 f. : il.

Orientador: Ricardo Carvalho Cabús.

Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 120-131.

Apêndices: f. 132-137.

Anexos: f. 138-145.

1. Arquitetura e tecnologia. 2. Iluminação natural. 3. Conforto ambiental. 4. Painel prismático. 5. Painéis – Corte a laser. I. Título.

CDU: 72:628.92(813.5)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO


Pedro Vítor Sousa Ribeiro

**SISTEMAS AVANÇADOS EM ILUMINAÇÃO NATURAL: ANÁLISE DA
INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO URBANA NA APLICAÇÃO DO
PAINEL DE CORTE A LASER EM MACEIÓ**

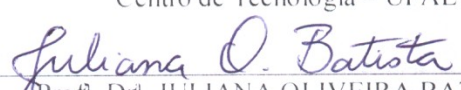
Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em ____/____/2017

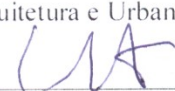
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. RICARDO CARVALHO CABÚS
Centro de Tecnologia – UFAL



Prof. Dr. JULIANA OLIVEIRA BATISTA
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



Prof. Dr. LEONARDO SALAZAR BITTENCOURT
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



Prof. Dr. ENEDIR GHISI
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Ao Sagrado Coração de Jesus e ao Imaculado Coração de Maria

Agradecimentos

Ao Sagrado Coração de Jesus, e ao Imaculado Coração de Maria pelos dons recebidos para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Marcos e Marta, e à minha irmã Júlia, pelo constante incentivo e atenção em minha formação, por me acompanhar nas diversas etapas do meu desenvolvimento moral e intelectual.

À Leticia, pela presença, carinho e incentivo no desenvolvimento do mestrado

Ao Professor Ricardo Cabús, pela orientação neste e em diversos trabalhos, além do agradecimento pelas oportunidades de crescimento na UFAL e no GRILU

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Iluminação – GRILU, especialmente à Lidiane Leitão e a Orestes Bastos pela amizade e incentivo.

Aos professores Rubens Duarte e Thiago Martins por terem me apresentado, ainda na graduação, a arquitetura.

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa.

À Universidade Federal de Alagoas e ao Grupo de Pesquisa em Iluminação – GRILU pelas oportunidades concedidas.

*“Nós somos o que fazemos. O que não se faz não existe.
Portanto, só existimos quando fazemos. Nos dias que não
fazemos, apenas duramos”*

Padre Antônio Vieira

RESUMO

A utilização de elementos que auxiliem o projetista a tornar os ambientes mais confortáveis e eficientes parte de uma análise que identifique as melhores soluções para cada contexto. Estudos mostram que a utilização de painéis de redirecionamento da luz em aberturas laterais reduz a incidência de luz direta do sol na área próxima da janela, aumenta luz difusa no primeiro terço da sala mais próximo a janela e melhora a distribuição total de luz no ambiente. O presente trabalho busca analisar a aplicação do painel de corte a laser em um cenário de verticalização urbana em Maceió. A metodologia utilizada se divide em duas partes: a primeira consiste na elaboração de um algoritmo adicional para o TropLux que permita simular computacionalmente o material escolhido, o seu desempenho foi verificado através da comparação da refletância e transmitância direcionais obtidas e os valores encontrados na literatura. A segunda parte busca analisar a utilização do elemento avançado em um cenário de adensamento urbano utilizando o algoritmo desenvolvido, onde os modelos foram analisados utilizando parâmetros de iluminância média e sua uniformidade, bem como uma análise estatística dos dados. A validação realizada aponta que o funcionamento do módulo corresponde a outros resultados da literatura, obtidos em medições com instrumentos, atestando a sua eficácia. A análise dos modelos urbanos aponta que o painel posicionado na vertical, a 0° , funciona bem como protetor solar contra os raios diretos do sol. Para função de redirecionamento da luz o elemento apresentou melhores resultados para céus parcialmente encobertos quando aplicado a 30° e para céus claros a 45° de inclinação, independente da orientação do cânion urbano. Entretanto cenários de reduzida visão de céu, menores que 20%, apresentaram comportamento distinto, requerendo análises complementares.

Palavras Chave: Iluminação Natural, Conforto Ambiental, Painel Prismático, Painel de Corte a Laser

ABSTRACT

The use of elements that help the project designer to make the environments more comfortable and efficient comes from an analysis that identifies the best solutions for each reality. Studies show that the use of light redirection panels in side openings reduces the incidence of direct sunlight in the area near the window, increases diffuse light in the first third of the room closest to the window, and improves the overall distribution of light in the room. The present work studies the laser cut panel application in an urban verticalization scenario in Maceió. The methodology used is divided into two parts: the first one consists in the elaboration of an additional algorithm for the TropLux software that allows to simulate computationally the material chosen, and its performance was verified after a comparison of the reflectance and transmittance directional obtained, and the values found in literature; The second part aims to analyze the advanced element utilization in an denser urban environment using the developed algorithm, in which the models were analyzed using parameters of average illuminance and its uniformity, as well as the statistics analysis of the data. The validation carried out indicates that the operation of the module corresponds to other results obtained in literature, attesting its effectiveness. The urban models analysis results indicate that the panel positioned vertically, at 0° , works well as sunscreen against the direct rays of the sun. For light redirection function the element presented better results for clear skies partially covered when applied at 30° , and at 45° of inclination for clear skies, independent of the urban canyon orientation. However, scenarios of reduced vision of sky, less than 20%, presented different behavior, this need complementary analysis.

Key Words: Daylight, Environmental comfort, Prismatic Panel, Laser Cut Panel

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Cenários de cânion urbano para as cidades de Hong Kong (a) e Santa Catarina (b)	29
Figura 2	- Aplicação de marquise como protetor solar em aberturas laterais	33
Figura 3	- Prateleira de luz associada à janela	33
Figura 4	- Alguns sistemas desenvolvidos por Koster para lamelas côncavas e convexas	35
Figura 5	- Exemplo de painel OakSolar	36
Figura 6	- Redirecionamento dos feixes luminosos para diferentes ângulos de incidência nos perfis RetroLux U e RetroLux O	37
Figura 7	- Difusor de luz associado ao heliostato instado no Edifício Morgan, em Washington DC	38
Figura 8	- Duto de luz com cobertura altamente refletiva	38
Figura 9	- Exemplo de aplicação do duto de luz em edifício de escritório	39
Figura 10	- Sistemas Anidólicos zenitais no aeroporto internacional de Zurique .	40
Figura 11	- Edifício Hamm, 1915. As estruturas quadradas sobre as vitrines são painéis prismáticos	41
Figura 12	- Quatro tipos comerciais de painel prismático e uma seção transversal para visualização do redirecionamento dos raios	41
Figura 13	- Transmitância direcional do painel prismático 45/45 e comportamento dos raios solares para um painel prismático 48/5	42
Figura 14	- Sistema de sombreamento direcional utilizando HOEs na Shell Solar Factory, Gelsenkirchen	43
Figura 15	- Filme com angulação luminosa seletiva observado através de um microscópio	44
Figura 16	- Painel coletor de luz solar com captadores móveis eletronicamente e sistema de difusão da luz no ambiente interno por meio de placa difusora	45
Figura 17	- Centro Nacional Aquático construído para os Jogos Olímpicos de 2008 em Beijing. Estruturas com isolamento interno em aerogel	46
Figura 18	- Mudança na transmitância do material quando é inserido em seus canais: ar (a), líquido com densidade igual à do polímero (b) e líquido com pigmento preto (c)	47
Figura 19	- Deformação provocada no DDCS, é possível observar como as superfícies paralelas de reflexão mudam de ângulo com a deformação	47
Figura 20	- <i>Painel de corte a laser</i> , com vista desobstruída através do elemento.	48

Figura 21 - Aplicação de um painel de corte a laser em uma escola na cidade de Brisbane, Austrália. Os painéis estão aplicados nas janelas altas.	49
Figura 22 - Comportamento dos raios luminosos ao incidir no PCL	50
Figura 23 - Fração da luz incidente que é defletida pelo PCL para ângulo de corte 0° (horizontal) e 7° (inclinado para o interior do ambiente), para diferentes razões de D/W.	51
Figura 24 - Exemplo de painel canal e representação do funcionamento do painel canal para diferentes alturas solares.	51
Figura 25 - Exemplo de geometria complexa processada utilizando o TropLux.	57
Figura 26 - Fluxograma de etapas metodológicas do trabalho	60
Figura 27 - Exemplo de modelo urbano utilizado nos processamentos	67
Figura 28 - Modelo do ambiente utilizado nos processamentos	67
Figura 29 - Exemplo de aplicação do PCL na janela alta	69
Figura 30 - Fatores de visão de céu para os três cenários estudados	69
Figura 31 - Disposição dos pontos em malha no ambiente de simulação	70
Figura 32 - Esquematização do comportamento do raio de luz ao interagir com um elemento prismático	75
Figura 33 - Divisão do céu em 145 partes sobre a divisão de 5221	76
Figura 34 - Fluxograma para processamento dos coeficientes diretos de luz natural	77
Figura 35 - Diagrama de contribuição de céu direto para os pontos distantes 1, 3 e 5 metros de distância da abertura, para o modelo proposto	78
Figura 36 - Fluxograma para processamento dos coeficientes difusos de luz natural	80
Figura 37 - Diagrama de contribuição de céu difuso para os pontos distantes 1, 3 e 5 metros de distância da abertura, para o modelo proposto	81
Figura 38 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro comum analisado a partir do algoritmo desenvolvido pelo autor, da formulação de Edmonds (2000) e de Tregenza (1993)	82
Figura 39 - Nuvem de dados de refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro comum	82
Figura 40 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro prismático, com incidência na face prismática, analisado a partir do algoritmo desenvolvido, da formulação de Laouadi et al. (2012) e Andersen et al. (2004)	83

Figura 41 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro prismático com raios incidindo sobre a face prismática.	84
Figura 42 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro prismático, com incidência na face lisa, analisado a partir do algoritmo desenvolvido, da formulação de Laouadi et al. (2012) e Andersen et al. (2004)	85
Figura 43 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro prismático com raios incidindo sobre a face lisa	86
Figura 44 - Transmitância e Refletância direcional para o PCL analisado a partir do algoritmo desenvolvido e dos dados da IEA (1999)	87
Figura 45 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o PCL	88
Figura 46 - Exemplo de deflexão da luz incidente pelo lado direito do painel para o elemento real (EDMONDS, 1993) e para o algoritmo proposto, com o mesmo ângulo de incidência.	88
Figura 47 - Deflexão dos raios luminosos para os três tipos de PCL, com os resultados obtidos pelo raio traçado, utilizando o algoritmo desenvolvido, e o obtido de Edmonds (1993)	89
Figura 48 - Gráfico de Iluminância Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos sem o PCL	91
Figura 49 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos sem o PCL	92
Figura 50 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos sem o painel de corte a laser	93
Figura 51 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 0°	93
Figura 52 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 0°	94
Figura 53 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 0°	95
Figura 54 - Setores de admissão de raios luminosos no painel de corte a laser	96
Figura 55 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser na vertical, nos três cenários propostos	96

Figura 56 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 15°	97
Figura 57 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 15°	98
Figura 58 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 15°	99
Figura 59 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 15°, nos três cenários propostos	99
Figura 60 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 30°	100
Figura 61 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 30°	101
Figura 62 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 15°	101
Figura 63 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 30°, nos três cenários propostos	102
Figura 64 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 45°	103
Figura 65 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 45°	104
Figura 66 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 45°	104
Figura 67 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 45°, nos três cenários propostos	105
Figura 68 - Dendograma com destaque para os grupos encontrados a partir da análise de agrupamento	108
Figura 69 - Efeito da refração entre dois meios	139
Figura 70 - Relação entre ângulo de incidência e de refração para índices de refração iguais e diferentes	139

- Figura 71 - Relação entre ângulo de incidência e de refração para índices de refração iguais 140 e diferentes
- Figura 73 - Índices de Reflexão e transmissão para meios com índice de refração 142 diferentes, para raios vindos na direção de 1 para 2 (a) e no sentido inverso (b).
- Figura 74 -Transmitância e refletância direcional para os modelos 1, de Edmonds (2000), 144 2, pelos coeficientes de Fresnel apresentados por Hetch (2002) e 3, pela formulação de Tregenza e Sharples (1993)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos tipos de céu proposta pela CIE	54
Tabela 2 - Refletância das superfícies do modelo	68
Tabela 3 - Céus utilizados na simulação computacional	71
Tabela 4 - Descrição dos Tipos de planos originais permitidos pelo TropLux e a nova tipologia utilizada	74
Tabela 5 - Matriz de Correlação para o conjunto de dados completo	107
Tabela 6 – Síntese dos casos por grupo encontrado na análise por agrupamento	109
Tabela 7 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 1	110
Tabela 8 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 2	111
Tabela 9 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 3	111
Tabela 10 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 4	112
Tabela 11 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 5	113
Tabela 12 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 6	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Referenciais teóricos utilizados nas comparações para validação do algoritmo	64
Quadro 2 - Parâmetros Urbanísticos para Zona Residencial 4 (ZR-4).	66
Quadro 2 - Parâmetros Urbanísticos para Zona Residencial 4 (ZR-4).	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIE – Commission Internationale de l'Éclairage (Comissão Internacional de Iluminação)

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)

PCL – Painel de Corte a Laser (*Laser Cut Panel*)

FVC – Fator de Visão de Céu (*Sky View Factor*)

H/W – Relação entre altura dos edifícios pela largura da via

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos.....	23
1.1.1	Geral.....	23
1.1.2	Específicos.....	23
1.2	Estrutura da Dissertação	23
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1	Luz Natural: Usuário e Ambiente Construído	25
2.2	Luz Natural e Ambiente Urbano dos Trópicos.....	27
2.3	A Luz Natural: Conceitos e Ferramentas	31
2.3.1	Dispositivos de Captação e Controle da Luz.....	31
2.3.2	Sistemas Tradicionais.....	32
2.3.3	Sistemas Avançados	34
2.3.3.1	Perfis Inovadores de Brises	35
2.3.3.2	Sistema OkaSolar®.....	36
2.3.3.3	Heliostatos.....	37
2.3.3.4	Dutos de Luz.....	38
2.3.3.5	Sistemas Anidólicos.....	39
2.3.3.6	Vidro Prismático.....	40
2.3.3.7	Sistemas de Holografia Óptica (HOEs) e de Bloqueio Seletivo (<i>Film Selective Glazing</i>).....	43
2.3.3.8	Captadores com Fibra Óptica Integrada.....	44
2.3.3.9	Materiais Isolantes Transparentes – Aerogel	45
2.3.3.10	Sistemas Dinâmicos de Controle da Luz Natural (SDCLN).....	46
2.3.3.11	O <i>Laser Cut Panel</i> – Painel de Corte a Laser (PCL).....	48
2.4	Simulação Computacional.....	53

2.4.1	Radiosidade	55
2.4.2	Raio Traçado (<i>Ray Tracing</i>).....	55
2.4.3	O <i>Software</i> TropLux.....	56
2.4.3.1	Método Monte Carlo	57
2.4.3.2	Coefficientes de luz natural	58
2.5	Conclusão	58
3.	FERRAMENTAS E MÉTODOS	60
3.1	Algoritmo Computacional	60
3.1.1	Desenvolvimento.....	61
3.1.2	Análise dos Resultados e Validação.....	63
3.2	Modelos Urbanos.....	65
3.2.1	Desenvolvimento.....	65
3.2.2	Definição do PCL.....	68
3.2.3	Síntese dos Parâmetros de Modelo Propostos.....	69
3.2.4	Parâmetros de Simulação	70
3.2.5	Apresentação e Análise dos Resultados	71
3.3	Conclusão	72
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	73
4.1	Algoritmo Computacional	73
4.1.1	Desenvolvimento - Entrada de Dados	73
4.1.2	Desenvolvimento - Processamento de Dados	75
4.1.3	Comportamento – Coeficientes Diretos	78
4.1.4	Comportamento – Coeficientes Difusos.....	79
4.1.5	Validação – Vidro Comum.....	81
4.1.6	Validação – Vidro Prismático	83
4.1.7	Validação – Painel de Corte a Laser	86
4.1.8	Conclusão da Validação	89

4.2	Avaliação Quantitativa dos Modelos	90
4.2.1	Modelo sem PCL	90
4.2.2	Modelo com PCL a 0°	93
4.2.3	Modelo com PCL a 15°	97
4.2.4	Modelo com PCL a 30°	100
4.2.5	Modelo com PCL a 45°	102
4.2.6	Síntese dos Resultados	105
4.3	Avaliação Estatística dos Modelos	107
4.3.1	Correlação – Conjunto Completo de Dados.....	107
4.3.2	Análise de Agrupamento	108
4.3.3	Grupo 1.....	109
4.3.4	Grupo 2.....	110
4.3.5	Grupo 3.....	111
4.3.6	Grupo 4.....	112
4.3.7	Grupo 5.....	113
4.3.8	Grupo 6.....	113
4.3.9	Conclusão da Análise Estatística.....	114
5.	CONCLUSÃO	116
5.1	Limitações da Pesquisa e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	119
	REFERÊNCIAS	120
	APÊNDICE A – Algoritmo da Função ‘Fprismtr.M’	132
	APÊNDICE B – Algoritmo da Função ‘Fprismref.M’	133
	APÊNDICE C – Algoritmo da Função ‘Fprismreftr.M’	134
	APÊNDICE D – Conjunto de Dados Utilizados	135
	ANEXO A – Conceitos Utilizados: Princípios Ópticos nos Dispositivos Avançados de Iluminação Natural	138
	Refletância e Transmitância	138

A lei de Snell	138
Reflexão total interna	139
Os coeficientes de Fresnel.....	140
ANEXO B – Escolha da Formulação Utilizada	143

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o aproveitamento dos recursos naturais dentro das edificações foi estratégia importante para seu aprimoramento ao longo do tempo. Os ambientes ganham novas dimensões com o desenvolvimento de novos sistemas estruturais como o arco, tornando possível a execução de grandes vãos com aberturas zenitais, ideais para captação de luz natural (BAKER; STEEMERS, 2002). Com a evolução das técnicas construtivas e a abundância de combustíveis de baixo custo, principalmente após a primeira metade do século XX, as atribuições do arquiteto relativas ao conforto térmico, acústico e luminoso, e suas inter-relações com o entorno e com os meios naturais, foram gradativamente esquecidas em substituição aos meios artificiais (CORBELLA; YANNAS, 2010).

Em um contexto em que grande parte da energia provida às edificações é convertida em iluminação e refrigeração artificial, é importante que novas estratégias sejam adotadas para a redução da dependência que esses meios causam. Através de uma visão sustentável na arquitetura, é possível a criação de espaços saudáveis, economicamente viáveis e que atendam às necessidades sociais, respeitando os sistemas naturais (EDWARDS, 2008). A maioria dos prédios urbanos usam eletricidade para suplementar a luz natural durante o dia (TREGENZA; WILSON, 2011). A iluminação artificial, atualmente, corresponde a até 24% do consumo de energia elétrica em edifícios empresariais e 19% nos residenciais, apontando o potencial de melhoria de consumo nesses setores (LAMBERTS et al, 2014). Segundo Oakley et al. (2000), a melhor utilização da luz natural dentro das edificações pode proporcionar entre 20 e 30% de economia de eletricidade, quando comparado ao custo total da construção.

A adoção de soluções arquitetônicas que privilegiem a interação com o clima local reduz a necessidade da utilização de meios artificiais para promoção do conforto aos usuários, tornando-os apenas complemento dos meios naturais (LESLIE, 2003). A configuração urbana influencia a recepção da radiação solar e a perda de calor nas cidades, logo, o projeto dessas variáveis pode alterar significativamente as condições no ambiente externo e interno (LITTLEFAIR, 1998).

Nessa perspectiva de melhoria na qualidade da iluminação natural em ambientes internos no meio urbano, surgem elementos que buscam solucionar algumas das problemáticas encontradas em sua aplicação. Os sistemas avançados, ou inovadores, de redirecionamento da luz são aqueles que conduzem a luz natural a regiões do ambiente até então pouco iluminadas.

Esses, utilizam-se de dispositivos ópticos que refletem, refratam ou que usam de reflexão total interna¹ da luz para atingir o objetivo a que foram projetados (IEA, 2000). Ainda segundo o autor, a escolha do dispositivo deve seguir parâmetros como disponibilidade de luz, incluindo nebulosidade e obstruções, o objetivo que se deseja alcançar com o elemento, as restrições operacionais e a integração com a arquitetura da edificação. Parâmetros econômicos também devem ser verificados, bem como a disponibilidade desses materiais na região.

Segundo Amorim (2002), existem diversos tipos de sistemas que podem ser associados às janelas ou a aberturas zenitais para melhorar a quantidade de luz e sua distribuição nos ambientes. Dispositivos zenitais, como dutos de luz, são comumente associados a situações onde não há verticalização das edificações e há visão de céu desobstruída. Já outros dispositivos, como o painel de corte a laser (PCL), funcionam através da reflexão da luz proveniente das regiões mais altas do céu para o fundo dos ambientes (LABIB, 2012). Esse sistema consiste em uma placa de acrílico onde são feitos cortes paralelos formando pequenos prismas; a superfície de corte se torna refletora, sendo comumente aplicado entre camadas de vidro (EDMONDS, 1993).

Estudos mostram que a utilização de painéis de redirecionamento da luz em aberturas laterais reduz a incidência de luz direta do sol na área próxima da janela, aumenta a luz difusa no primeiro terço da sala mais próximo à janela e melhora a distribuição total de luz no ambiente (EDMONDS, 1993; LAAR, 2001; CIAMPINI, 2005; SANTOS, 2009; LABIB, 2012; CHAVES, 2012). Ciampini (2005) aponta que a maioria dos estudos em sistemas como o painel de corte a laser não se atém às características ópticas dos materiais, limitando-se apenas ao estudo qualitativo de suas aplicações.

As pesquisas realizadas com o painel de corte a laser limitam-se à definição da melhor aplicação para o material, sem levar em consideração as obstruções externas. Ao passo em que a verticalização reduz a área de céu visível, os níveis de luz provenientes dos meios naturais, de forma direta e refletida, são reduzidos, sendo necessária a verificação da influência do entorno em sua aplicação. Tendo em vista a falta de estudos sobre a relação entre o entorno construído e a aplicação de elementos avançados em iluminação natural propõe-se tal estudo utilizando as ferramentas e parâmetros que serão descritos nos próximos capítulos.

¹ Ver Anexo A

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar a aplicação de painéis prismáticos de corte a laser (PCL) em um cenário de verticalização urbana na cidade de Maceió.

1.1.2 Específicos

- Desenvolver algoritmo computacional adicional para o *software* TropLux com a finalidade de simular o comportamento da luz através de materiais prismáticos;
- Avaliar o desempenho do dispositivo utilizando como parâmetro o fator de visão de céu (FVC) em cenário urbano para a cidade de Maceió;
- Comparar ganhos em iluminância nos ambientes com aplicação do PCL em relação à tipologia original no cenário proposto.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em quatro partes, iniciando pela revisão de literatura, seguindo com a metodologia e ferramentas, depois os resultados e discussões e, por fim, as conclusões.

Na revisão de literatura, serão abordados os referenciais teóricos necessários à compreensão do problema, como a utilização da iluminação natural na arquitetura, os elementos tradicionais e avançados em iluminação natural, as técnicas de predição da sua disponibilidade nas edificações e a fundamentação física da luz necessária à compreensão dos efeitos de refração dos raios luminosos.

A metodologia divide-se em duas partes: inicialmente, serão apresentadas as formulações físicas utilizadas no desenvolvimento do módulo adicional do TropLux e o porquê da escolha

de tais ferramentas. Posteriormente, será apresentado o método utilizado para o teste do módulo, em uma situação de adensamento urbano em Maceió, de forma a verificar os objetivos citados anteriormente.

A seção de resultados e discussões divide-se em duas partes, conforme apresentado na metodologia, onde: na primeira serão apresentados os testes realizados com a nova ferramenta de simulação e na segunda os resultados relativos aos estudos da relação entre o fator de visão de céu e a posição do painel de corte a laser. Por fim, na conclusão, será apresentada a síntese dos principais resultados, bem como as considerações obtidas através deles e as limitações e aberturas do trabalho a novas pesquisas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Luz Natural: Usuário e Ambiente Construído

A utilização da luz natural nas edificações não pode ser classificada como uma necessidade recente, fruto das transformações da sociedade atual, mas deve ser tratada dentro de seu contexto histórico de evolução e adaptação do uso ao longo do tempo. É certo que os requisitos dos usuários quanto à necessidade de janelas nos ambientes, seja para iluminar a tarefa ou para promover um efeito artístico, muda ao longo do tempo, mas certos parâmetros – como quantidade de luz e ofuscamento – sempre estiveram presentes para aqueles a quem coube o ofício de projetá-las. A história da arquitetura muitas vezes se confunde com a história da janela e da forma como a luz natural penetra nos ambientes, permitindo que o ar entre, que a luminosidade o permeie e que o usuário possa ver o exterior (PHILLIPS, 2004).

Diversos movimentos arquitetônicos utilizaram a luz como meio de revelar forma, movimento e plasticidade às estruturas e às várias formas de arte nelas inseridas. As catedrais góticas e barrocas foram o expoente da utilização da luz para valorizar as qualidades do espaço, seja revelando formas pelo contraste entre claros e escuros ou pelo controle da luz, proporcionando ambientes convidativos ao recolhimento e à contemplação. Nesses movimentos, a luz define a exuberância escultural gravada na estrutura através de sua movimentação tridimensional pelas estruturas de passagem, incorporando dramaticidade e mistério ao espectador (BAKER; STEEMERS, 2002).

A luz natural traz consigo diversos fatores que devem ser tratados de acordo com a natureza do projeto ao qual ela se aplica. Phillips (2000) enfatiza que é impensável um projeto de design de uma edificação sem que se considere os fatores relativos à iluminação de seus interiores e que a utilização da luz natural possui grande importância nesse sentido, principalmente ao analisar o posicionamento da edificação, suas possíveis obstruções e fontes de ofuscamento. O mesmo autor alerta que o dimensionamento das janelas deverá considerar “aquilo que é percebido pelos olhos” (PHILLIPS, 2000, p. 9) e o que a visão causa no usuário. Fatores como as fontes de ofuscamento, a quantidade e a qualidade de luz necessária à acuidade da tarefa, o senso de conexão com o ambiente externo e com o decurso natural do dia são de grande importância para prover conforto luminoso ao usuário.

O espectro luminoso emitido por fontes de luz artificial não consegue abranger todo o intervalo de comprimento de onda visível pelo olho humano com a mesma intensidade da luz natural, pela limitação que cada elemento tem em produzi-lo (BOOMEL; ROUHANA, 2011). A nossa visão, historicamente adaptada a enxergar com maior precisão utilizando o espectro eletromagnético visível completo, perde em precisão com o uso de lâmpadas. Os autores apontam que a iluminação artificial tende a evidenciar cores específicas, a depender do tipo de lâmpada, o que não acontece quando a tarefa é iluminada naturalmente.

Outros aspectos positivos relacionados à luz natural dizem respeito diretamente à saúde humana, como a regulação do ciclo circadiano e a produção de vitaminas. Mahnke (1996) afirma que o decurso da luz, seja diurna ou noturna, regula a forma como o corpo ajusta diversos aspectos biológicos – como metabolismo, pressão sanguínea, temperatura corporal, hormônios, como o cortisol, entre outros. A perda da percepção dessa variação, quando o usuário se encontra isolado do meio externo, resulta em uma desordem do ciclo biológico, podendo acarretar problemas de saúde e de memória de curto e longo prazo. Boubekri (2008) cita estudos que mostram haver uma relação direta entre o espectro luminoso e a quantidade de vitamina D produzida pelo corpo, sendo o espectro da luz natural o que garante a correta produção dessa vitamina pelo corpo humano.

A variação da luz natural ao longo do dia – não só associada ao movimento aparente do sol, mas também às obstruções externas, à variação da nebulosidade e outros aspectos pontuais – faz com que o usuário se conecte com o meio externo (LI; ERNEST, 2007). Essa conexão gera não somente respostas objetivas, mas uma resposta emocional, e conseqüentemente uma sensação de extensão do espaço de vivência, que vai além do recinto ocupado, resultando em uma satisfação psicológica (PHILLIPS, 2004).

Ao analisar o curso das edificações ao longo da história, verifica-se a constante preocupação com a utilização da luz, seja para iluminar ou para representar a função mística e simbólica do monumento. Para Phillips (2000), o elemento visual da edificação, como realização da tarefa ou como expressão artística, deve ser explorado em todos os projetos, mesmo que esses deem significâncias diferentes a tais aspectos. “A percepção visual deve ser objeto de todos os projetos, não podendo ser ignorada” (id, 2000, p.4), mostrando que a luz revela a arte da arquitetura presente nas estruturas e dá ao usuário condições de senti-la e contemplá-la.

Diante da importância de utilizar os meios naturais de condicionamento nas edificações, surge no profissional de arquitetura a necessidade de conhecer os fenômenos que envolvem a dinâmica do clima local a fim de aproveitá-lo. Ikeda (2012) mostra que para se chegar a um bom projeto arquitetônico, no tocante ao conforto ambiental, dois pontos norteadores podem ser postos:

O primeiro seria a utilização de métodos de análise e projeto com foco em conforto ambiental e iluminação natural para análise de projetos em elaboração ou finalizados; o segundo seria a utilização de projetos exemplares do ponto de vista do conforto ambiental e iluminação natural para compor repertório de tipologias arquitetônicas. (IKEDA, 2012, p.186)

O primeiro passo diz respeito diretamente à forma como os projetos são analisados, mostrando que algumas metodologias, como a simulação com modelos computacionais, são de grande importância na verificação das soluções técnicas e arquitetônicas encontradas. Em uma segunda etapa, a produção de edificações que utilizam de forma inteligente e eficiente dos meios naturais resulta em um legado arquitetônico ligado ao conforto ambiental que serve de inspiração para as novas edificações. Nesse sentido, a escolha da tipologia arquitetônica terá implicações diretas no aproveitamento dos recursos naturais.

A unicidade de soluções arquitetônicas das fachadas, encontrada principalmente nos edifícios que seguem o estilo internacional, torna-se um problema quando os fatores climáticos são analisados. Hopkinson e Kay (1972) apontam que algumas fachadas, pelas suas orientações, recebem muito mais carga térmica proveniente do sol que outras, evidenciando que as janelas devem ser dimensionadas de acordo com a sua orientação, com as obstruções de entorno e outros aspectos que interferem na disponibilidade de luz no interior da edificação. Nesse sentido, a concepção de projetos que busquem a utilização dos condicionantes naturais requer que o profissional tenha conhecimento do funcionamento do clima, de dados climáticos locais, da forma como as variáveis de entorno influenciam a edificação e de um repertório técnico de estratégias que possam ser aplicadas à edificação (IZARD; GUYOT, 1983)

2.2 Luz Natural e Ambiente Urbano dos Trópicos

O aproveitamento dos recursos naturais para fins de conforto ambiental nas edificações é possível em cidades inseridas em diversos climas existentes no planeta, respeitando as particularidades que cada região traz consigo. Para Higuera (2006), o estudo do clima no

ambiente urbano é uma importante ferramenta de auxílio para o planejamento, construção e manejo de edificações. Diante disso, Barbirato et al. (2000) complementam que é de fundamental importância para planejador urbano o conhecimento das variáveis que envolvem o clima local, a fim de melhor utilizá-las.

O fenômeno de adensamento e verticalização das cidades modernas traz novos desafios para a análise do clima urbano, em que a variável do entorno se torna cada vez mais presente e relevante na disponibilidade dos elementos naturais para as edificações. Para Barbirato et al. (2000), é importante o reconhecimento da relevância que os estudos do clima nas cidades têm no planejamento urbano, sendo ele o meio eficaz para contribuir com diretrizes “climaticamente responsáveis sobre o seu ordenamento, crescimento e desenvolvimento, apoiados na qualidade ambiental dos espaços” (id, 2000).

No cenário de adensamento das cidades por verticalização, alguns fenômenos distinguem-se como importantes para aqueles que tratam de clima urbano, sendo o mais importante deles a formação das ilhas de calor. Nesse sentido, essa ilha de calor urbana, resultado do aumento da densidade construída em relação ao campo, caracteriza-se pelo aquecimento da atmosfera urbana em relação ao entorno não edificado (OKE, 1987).

Oke (1987) utiliza como um dos principais parâmetros de análise do processo da ilha de calor urbana o cânion urbano, descrito pelo autor como a região entre as paredes, ou fachadas, de dois edifícios adjacentes e o plano da rua que os separa. Seu cálculo é dado pela relação entre altura dos edifícios pela largura da via (H/W).

A alteração do H/W impacta diretamente no fator de visão de céu (FVC) ao nível da rua. Para Oke (1981), esse parâmetro é muito importante quando se analisa as trocas de calor e radiação dentro do cânion urbano, tanto que o autor desenvolve uma formulação matemática onde a máxima intensidade da ilha de calor é correlacionada diretamente com ele. Chapman et al. (2002) definem fator de visão de céu como um parâmetro percentual que relaciona a porção de céu visível a partir de um ponto e a porção potencialmente disponível para o mesmo ponto. Esse parâmetro assume valor 0 (zero) em um céu totalmente obstruído e 1 (um) em uma visão de céu livre de obstruções. Os cenários apresentados na Figura 1 mostram uma grande redução da visão de céu a partir do nível da rua, consequência do adensamento por verticalização.

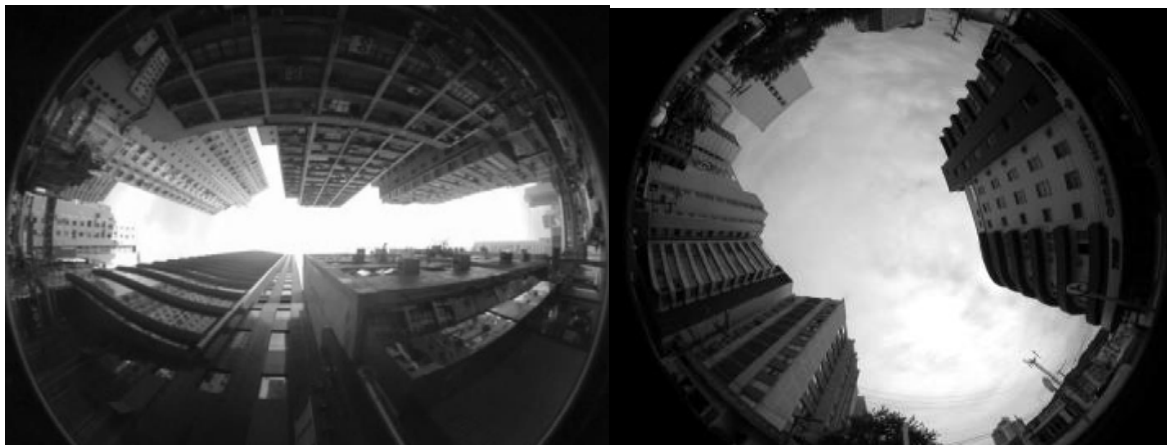


Figura 1 - Cenários de cânion urbano para as cidades de Hong Kong (a) e Santa Catarina (b)
Fonte: CHEN et al, 2012 e LEDER; PEREIRA, 2008

As consequências da redução do fator de visão de céu na disponibilidade de luz natural são comprovadas por diversos trabalhos. Leder e Pereira (2008) destacam que a ocupação urbana permitida pela legislação pode reduzir de forma significativa a disponibilidade de luz natural no cânion urbano e que a definição dos limites de obstrução deverá também basear-se em tais parâmetros. Em contrapartida, vias de grande largura também podem surtir efeito indesejado, como mostra Oliveira e Romero (2007), resultando em grandes fachadas expostas à radiação solar direta e, conseqüentemente, uma grande carga térmica absorvida. Estudos de Laranja et al. (2009; 2013) apontam que a largura das vias e a orientação das aberturas possuem relação direta com a disponibilidade de luz natural nos ambientes. Para eles, há a necessidade de se considerarem as relações da geometria urbana, como a relação H/W , bem como a orientação das aberturas na avaliação da disponibilidade de luz natural nos ambientes, e conseqüentemente haverá um ganho energético em decorrência do menor uso da iluminação artificial (id., 2013).

Outros estudos realizados em cidades brasileiras mostram a constante preocupação com a questão da disponibilidade de luz natural em cânions urbanos. Suga (2005), ao analisar esse fato na cidade de Curitiba, mostra que quando as edificações alcançam relações H/W superiores a 1 resulta em uma menor quantidade de iluminação natural disponível a nível de solo, fazendo com que as atividades nesses níveis necessitem de iluminação artificial. O autor conclui que relações H/W acima de 2, para a cidade de Curitiba, inviabilizam a utilização de luz natural no nível do solo, requerendo contínua utilização de recursos artificiais (id., 2005).

Estudo recente realizado por Lima (2015), para a cidade de Maceió, verificou que as diversas formas urbanas possíveis previstas no plano diretor da cidade para zonas de ocupação e verticalização recentes permitem que haja disponibilidade de luz natural suficiente ao longo

do dia. A autora cita ainda os estudos de Laranja (2010), para a cidade de Vitória - ES, que demonstraram significativa redução dos valores de iluminância em decorrência da presença de edificações obstruidoras, fato que não foi observado no trabalho de Lima (2015).

Ainda em Maceió, Araújo e Cabús (2007) concluem que, apesar de baixos valores de fator de visão de céu, as médias de iluminância interna foram satisfatórias quando analisada a contribuição das superfícies de entorno em tal iluminância. Para os autores, quanto maior o ângulo de obstrução vertical da janela, maior é a contribuição proveniente das superfícies externas, por reflexão. Em cânions profundos a contribuição da luz refletida torna-se componente predominante na iluminância total interna (id., 2007).

Os estudos de Lima (2015) utilizaram cenários onde a altura das edificações eram, no máximo, 30% maiores que a largura das vias – percentual bem menor que os valores analisados por Suga (2005). Outra questão importante são as zonas da cidade onde a consolidação das edificações já está em estágio avançado e o cânion urbano é mais profundo que nas demais.

A formação de adensados urbanos altamente verticalizados traz consigo outras implicações além da redução da disponibilidade de luz natural próximo ao solo, como o aumento da temperatura nessas regiões e a redução da permeabilidade ao vento. Mascaró (1997), ao tratar da configuração urbana e sua relação com a temperatura nas edificações, enfatiza que os ambientes devem ser tratados de forma ecotermicamente diferenciada, pois o adensamento promove regiões onde há menor ou maior incidência de ventos e insolação, modificando diretamente a temperatura do ar e a umidade.

O fator de visão de céu (FVC) não deve ser tomado como único parâmetro definidor das condições climáticas de adensamento urbano, como afirmam Minella et al. (2009). Para os autores, algumas características do desenho urbano como largura das vias, altura das edificações e orientação do cânion têm forte influência no ganho de radiação solar, e conseqüentemente no conforto do usuário. O fator de visão de céu, nesses casos, é útil ao servir como parâmetro urbanístico, contribuindo para uma organização sustentável do espaço e melhorando a conexão entre estudiosos do clima e projetistas (id., 2009).

2.3 A Luz Natural: Conceitos e Ferramentas

A luz natural é a radiação, no comprimento de onda visível entre 380nm e 780nm, proveniente do sol. A atmosfera e os elementos geográficos interagem com a luz advinda do sol pelos efeitos de reflexão, transmissão e absorção. Essa interação faz com que não apenas o sol seja tratado como fonte de luz natural, mas também o céu e o entorno (MOORE, 1991). A disponibilidade de luz natural nos lugares tem relação direta com as condições climáticas locais. A posição geográfica, a nebulosidade e a poluição atmosférica são alguns dos parâmetros que influenciam diretamente na quantidade de luz que chega até o solo, afetando as estratégias utilizadas nas edificações para captá-la (ANDER, 1995). A forma como a radiação solar chega até as edificações muda não só pelos fatores geográficos e locais, mas também ao longo do dia.

Bittencourt (2015) aponta que a diferença entre a disponibilidade luminosa no nascer do sol e ao meio dia é explicada pela forma como os raios luminosos incidem no plano do observador. Pela manhã, e no pôr do sol, os raios incidem de forma inclinada com relação ao plano do observador, até que ao meio dia passam a incidir próximo à perpendicular (id., 2015). Nesse sentido, a região tropical pode ser definida pela faixa terrestre em que o sol atinge, ao menos duas vezes ao ano, a posição do zênite na abóbada celeste (CABÚS, 2002). Mesmo possuindo uma faixa bem definida, entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, Koenigsberger et al. (1977) afirmam que existem sub-regiões climáticas dentro dessa mesma faixa, afetadas principalmente pela distância com relação ao oceano e à altitude.

2.3.1 Dispositivos de Captação e Controle da Luz

A janela é a estrutura básica de interface entre o meio interno e externo em uma edificação, e seu dimensionamento não deve pressupor unicamente a função de entrada de luz, mas diversos outros parâmetros que dizem respeito ao usuário e à edificação. Lam (1977) aponta a necessidade de informações visuais do usuário que utiliza um espaço, sejam essas internas ou externas. A percepção de localização, de passagem do tempo, de orientação e até de seu conforto psicológico influencia na forma e na determinação do tipo de abertura e na relação do usuário com ela (id., 1977). A captação de luz natural através da janela deve ser tratada de forma a abranger os diversos efeitos que sua entrada provoca ao meio interno. Diferentes

posicionamentos de abertura resultam em formas de entrada e de distribuição da luz distintas, restringindo seu uso e as estratégias de proteção e captação.

Alguns elementos permitem que a luz entre de forma zenital no ambiente, e normalmente são associados ao telhado ou à laje de cobertura – a exemplo da claraboia, o lanternim, o átrio, a mansarda e o *shed*, entre outros (LAMBERTS et al., 2014.). Alguns desses elementos funcionam ainda como exaustores de ar, auxiliando também no conforto térmico do ambiente, como a exemplo do *shed* (LUKIANCHUKI; CARAM, 2013). Para Holanda (1976), o clima tropical, pela sua característica de trajetória solar, requer que sejam adotados protetores solares nas janelas a fim de garantir o sombreamento, sem prejudicar a permeabilidade ao vento. O autor afirma ainda sobre a importância de estudar cuidadosamente a insolação para cada fachada a fim de desenhar protetores solares eficientes.

2.3.2 Sistemas Tradicionais

Existem diversos tipos de protetores solares que possuem aplicação relativamente simples se comparados aos demais, mas que trazem consigo grandes benefícios ao ambiente interno, são eles: a marquise, a prateleira de luz e o brise. Esses elementos buscam sobretudo garantir que não haja a entrada de sol direto no plano de trabalho e, quando possível, redirecionando a luz para o interior do ambiente de forma a melhor aproveitá-la.

A marquise (Figura 2), elemento mais simples e comumente encontrado de proteção solar, consiste em uma peça horizontal localizada no topo da janela, dimensionada de forma a proteger as partes mais próximas da abertura contra a insolação direta. É importante notar que a adição de qualquer elemento de proteção solar gera perda, em todo o plano de trabalho, da quantidade de luz pelo bloqueio da componente direta do céu e do sol. Entretanto, podem ocorrer ganhos pontuais por reflexão da luz em tais elementos.



Figura 2 - Aplicação de marquise como protetor solar em aberturas laterais
Fonte: PHILLIPS, 2004

Já a prateleira de luz (Figura 3) localiza-se um pouco abaixo do topo da janela, podendo, em alguns casos, avançar para dentro do ambiente, mantendo o mesmo ângulo de proteção solar. A luz natural, ao ser refletida pela prateleira para o topo do ambiente, chega a pontos distantes da janela, melhorando a qualidade na distribuição de iluminância. Estudos de Araújo et al. (2005) apontam que ela consegue reduzir significativamente a iluminância na área próxima à janela. É interessante notar que no mesmo estudo percebeu-se uma pequena influência da refletância do plano inferior da marquise, que redireciona a luz refletida no solo para dentro do ambiente, auxiliando na melhora da uniformidade luminosa no plano de trabalho (id, 2005).

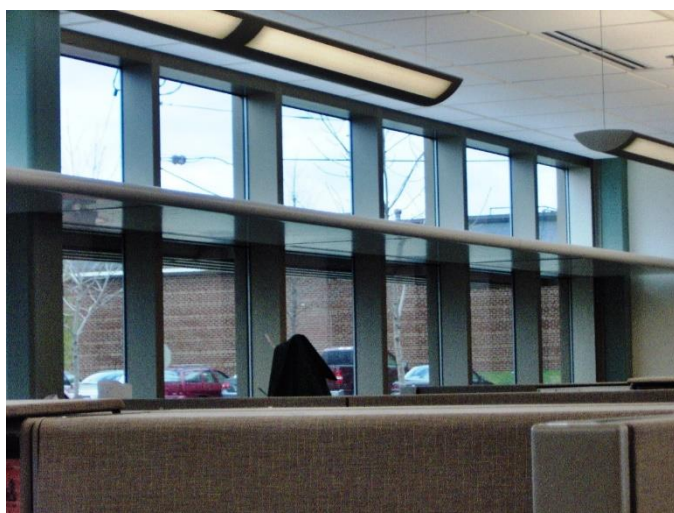


Figura 3 - Prateleira de luz associada à janela
Fonte: DWFCONTRACT, 2016

As análises de Cândido et al (2005) sobre desempenho luminoso de prateleiras de luz em um edifício escolar multidisciplinar apontaram suas potencialidades na redução do ofuscamento

próximo à janela bem como o ganho em iluminância nas regiões mais profundas. Para as autoras, é importante que os profissionais projetistas utilizem a criatividade ao especificar tais dispositivos, como forma de adaptar o elemento, que já é comprovadamente eficaz, às restrições arquitetônicas e plásticas encontradas (id., 2005).

O brise, ou *brise-soleil*, é um dispositivo de proteção solar que combina a proteção direta da marquise com a reflexão para o interior da prateleira de luz. Tal elemento consiste em lâminas, geralmente paralelas, externas à edificação, podendo ser posicionadas na horizontal, vertical ou combinadas, e fixas ou móveis. A principal função do brise é garantir a proteção solar e, em decorrência dos planos de reflexão paralelos, promover a entrada de luz indireta no ambiente (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). Elementos com funcionalidade semelhante são encontrados em diversas formas, mas o elemento como conhecido atualmente foi, segundo Corona e Lemos (1972), idealizado e denominado como tal por Le Corbusier para um de seus projetos no ano de 1933. O perfil simples do brise passou por diversas modificações ao longo do tempo a fim de aprimorar sua eficiência, como afirma Ciampini (2005). Sistemas como o OakLux® e o RETROLux® utilizam-se do mesmo elemento, mas incorporam avanços na forma da lâmina do brise, podendo ser tratados como sistemas avançados (id., 2005).

2.3.3 Sistemas Avançados

Diante das limitações que os tradicionais dispositivos de captação e controle da luz natural impõem, surgem novos elementos que buscam superá-las utilizando a tecnologia. Kazanas e Ors (2013) definem como sistemas avançados aqueles que aplicam os avanços tecnológicos do campo dos materiais e os conhecimentos ópticos existentes a fim de desenvolver elementos capazes de obstruir a luz solar direta, evitar o ofuscamento e transportar a luz natural, de forma refletida, para regiões mais distantes da janela.

São exemplos de tais sistemas o painel prismático, sistemas anidólicos, sistemas de holografia óptica, sistemas de transporte (como dutos de luz) e o painel de corte a laser. Todos esses elementos se valem de princípios ópticos dos materiais, a exemplo da reflexão total interna², como forma a promover aos ambientes ganhos que os sistemas tradicionais não permitem. Em alguns casos os sistemas são combinados de forma a obter melhor desempenho

² Ver Anexo A

em situações específicas, aumentando o ganho luminoso se utilizados de forma individualizada. São exemplos de tais combinações a adição de heliostatos, apresentado na seção 2.3.3.3, com captadores e dutos de luz (KIM; KIM, 2010) ou com painéis de corte a laser e dutos de luz. (KWOK; CHUNG, 2008)

2.3.3.1 Perfis Inovadores de Brises

Diante do efeito de ofuscamento gerado por brises, principalmente quando associados a painéis de vidro simples ou duplos, alguns perfis de lamelas foram desenvolvidos para garantir a entrada da luz com menos reflexões entre os elementos. Destaca-se, nesse sentido, o Engenheiro Helmut Köster, que desenvolveu um perfil de veneziana composto de diferentes partes (Figura 4), de forma a garantir no máximo duas ou três reflexões da luz entre eles para atravessar o elemento (KOSTER, 2002).

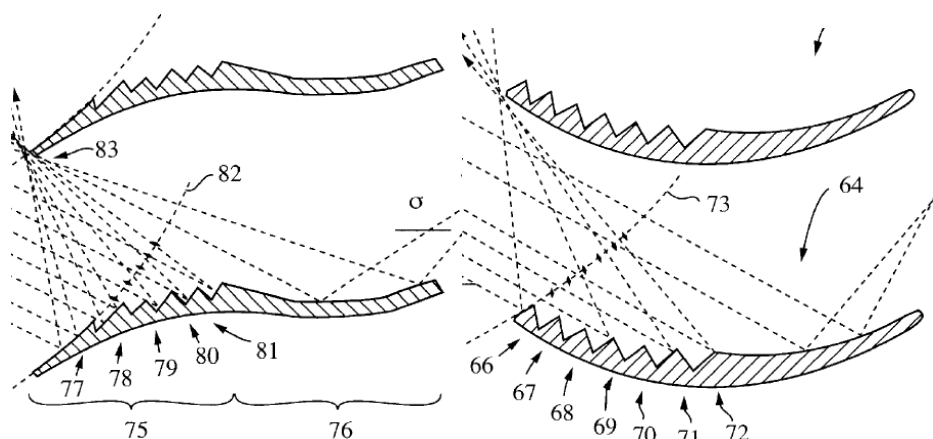


Figura 4 - Alguns sistemas desenvolvidos por Köster para lamelas côncavas e convexas
Fonte: KOSTER, 2002

No formato côncavo, o autor divide o elemento em duas partes: a primeira garante que os raios não façam muitas interreflexões nos elementos para atravessá-lo, pelo efeito da superfície serrilhada, já a segunda parte, lisa, impede que os raios solares diretos penetrem no ambiente (KOSTER, 2002). Outros elementos desenvolvidos por ele e presentes na patente utilizam-se do mesmo efeito, apenas com variações geométricas.

Estudos de Ciampini (2005) apontam que a variação do ângulo de aplicação dos elementos, quando o PCL é associado a painéis de vidro, permitem que o efeito do ofuscamento seja reduzido. A autora aponta também que a aplicação de tais dispositivos normalmente é feita em ambientes com pé-direito alto, tendo em vista a grande redução na entrada de luz pelo

elemento. Outras patentes de Koster (2001) ainda apresentam mais tipos de dispositivos, só que em superfícies delgadas.

2.3.3.2 Sistema OkaSolar®

Um avanço importante nos sistemas de lamelas foi a utilização de superfícies altamente refletivas. Koster *apud* Ciampini (2005) dá os primeiros passos para esses elementos, com uma composição que posteriormente seria denominada de sistema peixe (IEA, 2000), apresentado na Figura 5. Esse elemento consiste em lamelas triangulares de materiais altamente refletivos e polidos.

Em teoria, o sistema permite até 60% de transmissão da luz difusa utilizando lamelas de alumínio com refletância de 85% (IEA, 2000). Um problema do sistema peixe é a falta de proteção contra o acúmulo de sujeira e poeira, o que reduz, a longo prazo, sua eficiência. Um avanço nesse sentido é o sistema OkaSolar® (Figura 5), que insere o anterior entre dois painéis de vidro, alongando o lado interno para melhorar a proteção solar, aumentando a distância entre as lamelas para garantir maior ganho luminoso, e permitindo que o usuário gire as lamelas.



Figura 5 - Exemplo de painel OakSolar
Fonte: Catálogo Sistema OKALUX, 2002

O sistema OkaSolar® garante visão parcial do meio externo, entretanto, sua transparência dependerá do ângulo em que as lamelas forem posicionadas. A principal intenção do sistema é bloquear os raios solares diretos e redirecionar os raios refletidos para o teto do interior, melhorando a distribuição interna de luz. Os sistemas podem ser fixos (passivos) ou móveis (ativos). Combinando as diversas formas apresentadas por Koster (2002) ainda são fabricados

os painéis RETROLux®, que unem uma parte retro-refletora, na porção inicial, e um elemento reto que funciona como prateleira de luz (Figura 6).

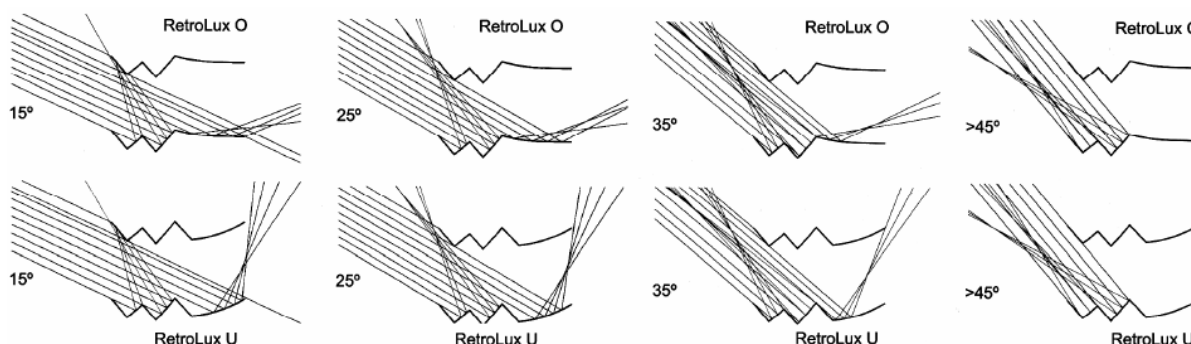


Figura 6 - Redirecionamento dos feixes luminosos para diferentes ângulos de incidência nos perfis RetroLux U e RetroLux O
Fonte: KOSTER, 2004

Estudos de Heim e Kieszkowski (2006) apontam que o sistema reduz significativamente a visão externa, e que os melhores resultados de distribuição da luz no ambiente são obtidos nas combinações em que as lamelas estão próximas o suficiente para bloquear toda a visão externa.

2.3.3.3 Heliostatos

Os heliostatos são sistemas que coletam e canalizam a luz natural, distribuindo-a de forma difusa no interior dos ambientes (Figura 7). Segundo Santos (2009), esses sistemas são compostos por três partes: a primeira é um coletor, ou concentrador, que capta a luz solar direta; a segunda é um túnel através do qual a luz é transportada, podendo ser pelo próprio ar ou por fibra óptica; e, por último, um emissor, que difunde a luz no interior do ambiente. O heliostato é principalmente utilizado para capturar a luz solar. Para tanto, é necessário um mecanismo computadorizado que faça o espelho captador côncavo acompanhar a trajetória solar, redirecionando a radiação para o duto de transmissão. A eficiência do sistema fica sempre condicionada à precisão do mecanismo de ajuste e da limpeza constante dos espelhos.



Figura 7 - Difusor de luz associado ao heliostato instalado no Edifício Morgan, em Washington DC
Fonte: Revista Metropolismag, 2016

2.3.3.4 Dutos de Luz

O duto de luz (Figura 8) é um sistema em que o captador é comumente um domo translúcido, transparente ou de outro material transmissivo, tal como painel de corte a laser ou vidros prismáticos. Segundo Ciampini (2005), um importante avanço para que os dutos de luz pudessem ter um grande ganho em eficiência foi a criação dos filmes plásticos altamente refletivos e finos, fazendo com que a perda luminosa por absorção seja minimizada.



Figura 8 - Duto de luz com cobertura altamente refletiva
Fonte: IEA, 2000

Os dutos permitem a captação luminosa superior ou lateral, sendo distribuída no ambiente como uma luminária de teto difusa (IEA, 2000). As primeiras aplicações do material são em

edifícios empresariais, como mostrado na Figura 9, com sistemas simples, que avançaram para aqueles que combinam luz natural e artificial na mesma luminária através do uso de sensores que mantêm constante o fluxo luminoso (SOTO, 2010).



Figura 9 - Exemplo de aplicação do duto de luz em edifício de escritório
Fonte: AL-MARWAEI e CARTER, 2005

O diâmetro do tubo de transporte é um fator decisivo no resultado do sistema de duto de luz em ambientes, entretanto não há uma formulação definida para o cálculo desse parâmetro. Diversos estudos (AL-MARWAEI; CARTER, 2006; TOLEDO; PELEGRINI, 2013) apontam que os tubos de 250 milímetros são os que conseguem atingir os melhores resultados com a menor dimensão. Estudos de Oakley et al. (2000) analisaram a aplicação de dutos de luz para longas distâncias e concluíram que a partir de 3 metros de distância o diâmetro do tubo deverá começar a aumentar para que o ganho luminoso se mantenha, mas que para tubos menores as dimensões apresentadas anteriormente suprem as necessidades.

2.3.3.5 Sistemas Anidólicos

Os sistemas anidólicos funcionam utilizando o princípio da óptica sem imagem, desenvolvido por Roland Winston (WELFORD; WINSTON, 1989). Tal princípio busca desenvolver concentradores luminosos parabólicos de forma a não exceder o limite termodinâmico do material refletor, fazendo com que ele superaqueça e perca suas características físicas (CIAMPINI, 2005). O mesmo princípio pode, ainda, ser aplicado tanto em aberturas zenitais, como mostrado na Figura 10, quanto laterais. Como esse tipo de dispositivo trabalha apenas com luz difusa a região de céu visível, chamada de setor de admissão (IEA, 2000), não deverá permitir entrada de luz solar direta.



Figura 10 - Sistemas Anidólicos zenitais no aeroporto internacional de Zurique.
Fonte: CIAMPINI, 2005

O mesmo princípio pode ser utilizado de diversas formas e combinações, a exemplo das aberturas zenitais anidólicas e prateleiras de luz com superfície anidólica. Baker e Steemers (2002) apontam que tais sistemas conseguem produzir aumento significativo do fator de luz do dia dentro das edificações, principalmente em sistemas zenitais. Santos (2009) enfatiza que tais dispositivos, por serem comumente de grande dimensão, devem ser desenhados como parte integrante da estrutura, em sua fase inicial.

2.3.3.6 Vidro Prismático

O vidro prismático é um dos primeiros elementos que recebem a classificação de sistema avançado, estando em uso há mais de um século. Tal sistema vem sendo utilizado desde que os processos de industrialização permitiram que fossem gravados padrões geométricos no vidro plano (RANDL, 2001). Um exemplo de aplicação do painel prismático é a galeria de lojas do pavimento inferior do edifício Hamm, em Minnesota, EUA (Figura 11).



Figura 11 - Edifício Hamm, 1915. As estruturas quadradas sobre as vitrines são painéis prismáticos
 Fonte: Interior Design, 2016

Atualmente, o painel prismático é fabricado apenas em acrílico (Figura 12) e alguns possuem uma fina camada de alumínio sobre uma das faces do prisma a fim de aumentar a proteção contra os raios solares diretos (IEA, 2000). Os painéis podem ser produzidos através de corte de prismas em uma placa de acrílico ou da incisão de micro ranhuras prismáticas no mesmo material, produzindo placas mais finas e de menor peso, mas com propriedades ópticas semelhantes ao modelo original (CHAVES, 2012).

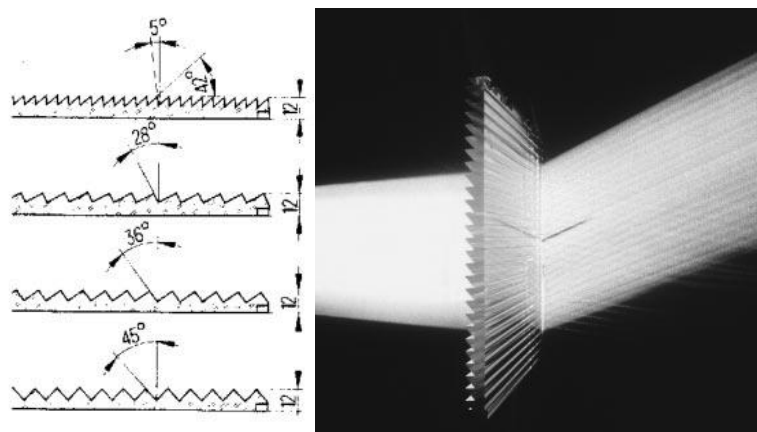


Figura 12 - Quatro tipos comerciais de painel prismático e uma seção transversal para visualização do redirecionamento dos raios luminosos
 Fonte: Adaptado IEA, 2000

O elemento é comumente posicionado em janelas acima do nível de visão do usuário e posicionado de forma a maximizar a captação de luz natural a fim de redirecioná-la para regiões mais profundas do ambiente. Sua aplicação pode ainda ser fixa ou em substituição às lamelas de sistemas de brises móveis, permitindo o ajuste do posicionamento pelo usuário (SANTOS,

2009), ou em sistemas móveis automáticos, utilizados também em aberturas zenitais (CIAMPINI, 2005).

Os raios luminosos, originados do sol ou do céu, interagem com o painel de diversas formas (Figura 13). Aqueles com alturas solares maiores tendem a ser refletidos para o exterior do ambiente ou serem refratados, atravessando o elemento. Já raios com alturas solares menores tendem a manter a sua trajetória, ou serem minimamente refratados (CIAMPINI, 2005). Os raios que incidem perpendicularmente à superfície plana do painel, pelo processo de reflexão total interna³, tendem a ser refletidos para o exterior, fazendo com que o painel não permita a visão do exterior através dele (IEA, 2000).

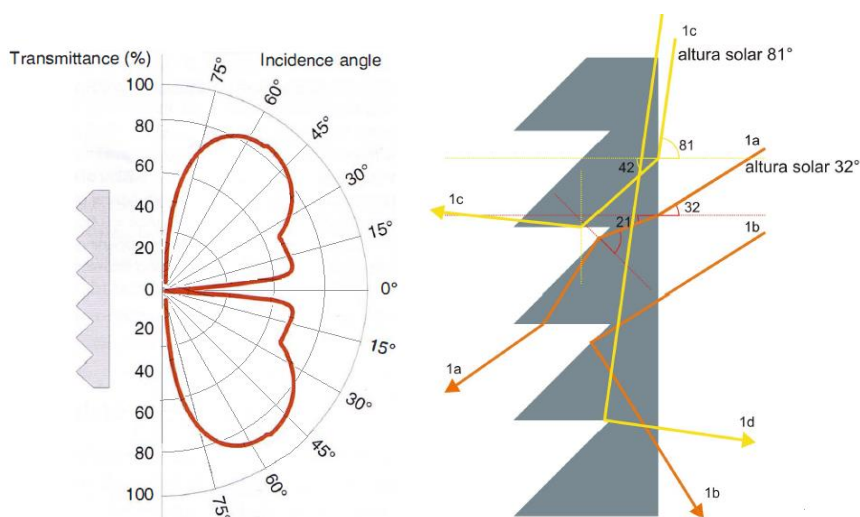


Figura 13 - Transmitância direcional do painel prismático 45/45 e comportamento dos raios solares para um painel prismático 48/5

Fonte: Adaptado de BAKER e STEEMERS, 2002; CHAVES, 2012

Algumas questões de posicionamento são importantes em sua instalação, uma delas é que a luz refratada pelo elemento não deve penetrar em ângulos muito próximos ao horizontal no ambiente, sob risco de causar ofuscamento. Outro ponto importante é que as superfícies iluminadas pelo elemento, como o teto, possuam alta refletância para auxiliar na redistribuição da luz refratada no ambiente interno.

Estudos apontados pela IEA (2000) mostram que para regiões onde há predomínio de céu encoberto ao longo do ano a aplicação do painel prismático não proporciona resultados expressivos, mas em climas onde predominam céus claros são observados ganhos significativos na distribuição de luz natural no ambiente. Outros estudos mostram ainda que a combinação de painéis prismáticos móveis e sistemas de automação com sensores de iluminância internos

³ Ver Anexo A

reduziu a quantidade de luz no interior do ambiente em fachadas onde há pouca incidência solar direta, principalmente em climas com predominância de céu encoberto (IEA, 2000).

Estudos como os de Bartenbach (1985), Lorenz (1998, 2001), Santos (2009) e Ciampini (2005) apontam diversos mecanismos para cálculo da melhor posição de aplicação dos painéis em diversos climas e orientações, bem como algumas diretrizes para a escolha do tipo de painel utilizado em situações específicas como bloqueio da luz solar direta ou redirecionamento dos raios difusos do céu.

2.3.3.7 Sistemas de Holografia Óptica (HOEs) e de Bloqueio Seletivo (*Film Selective Glazing*)

Os sistemas por holografia óptica (Figura 14) consistem em placas de vidro nas quais se aplica uma película fotossensível submetida a uma exposição luminosa de raios laser, gravando um padrão paralelo, formando uma grade de difração (JAMES; BAHAJ, 2005). Santos (2009) aponta que os filmes holográficos podem ser confeccionados com diferentes espaçamentos entre as estruturas paralelas, no entanto, aqueles com espaçamentos iguais tendem a difundir a luz solar direta, enquanto que linhas com espaçamentos alternados geram um efeito de focalização dos raios.



Figura 14 - Sistema de sombreamento direcional utilizando HOEs na Shell Solar Factory, Gelsenkirchen
Fonte: SANTOS, 2009

Ainda há sistemas onde são gravadas elipses concêntricas, permitindo que sejam bloqueados comprimentos de onda específicos, como a radiação infravermelha. Uma importante característica do material é que ele tende a decompor o espectro luminoso, gerando

o efeito de dispersão cromática⁴, resultando em manchas de diversas cores no teto do ambiente (CIAMPINI, 2005). Os sistemas holográficos são utilizados principalmente em concentradores de raios solares, então, segue a utilização em sistemas de aquecimento solar e em células fotovoltaicas. Sua aplicação ainda é restrita tendo em vista o grande custo operacional de instalação e manutenção dos sistemas móveis necessários à sua operação (IEA, 2000).

Alguns sistemas combinam os filmes holográficos com os de angulação seletiva, ou polarizados (Figura 15). Tais materiais são desenvolvidos com a adição de pequenas camadas metálicas ou de outro material opaco, dentro de filmes plásticos com alguns nanômetros de espessura, fazendo com que a luz incidente seja bloqueada para alguns ângulos e atravesse diretamente em outros (SMITH et al., 1998).

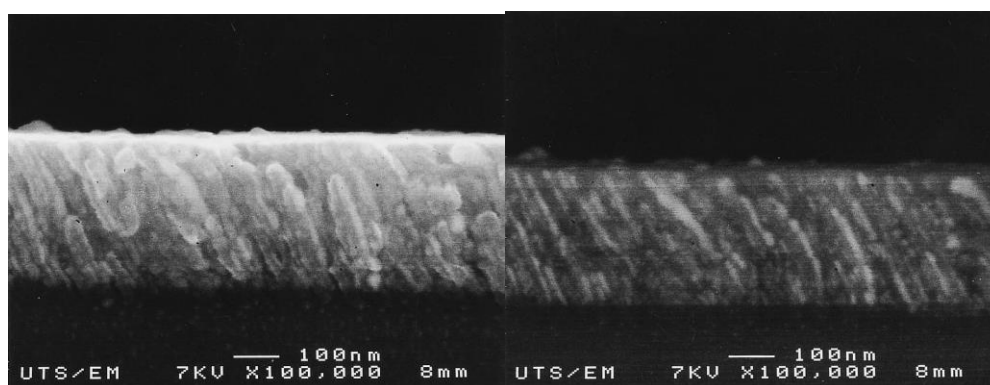


Figura 15 - Filme com angulação luminosa seletiva observado através de um microscópio
Fonte: SMITH et al., 1998.

Estudos de Alvarez et al. (2005) apontam que o sistema consegue reduzir os ganhos térmicos por radiação solar direta dentro do ambiente de 12 a 20%, dependendo das condições de entorno, para climas tropicais. Já Almanza e Correa (2003) apontam que em estudos feitos na Cidade do México conseguiram ter redução dos ganhos térmicos de até 22% com a adição de partículas de cobre nos elementos, com uma transmitância mínima de 30%.

2.3.3.8 Captadores com Fibra Óptica Integrada

Alguns dutos de luz possuem fibras ópticas como método para transporte dos raios solares, permitindo maior mobilidade no transporte da luz em maiores distâncias, com perdas mínimas. Nesses dutos, o coletor de luz natural não mais tem formato de domo ou piramidal,

⁴ Ver Anexo A

mas consiste em painéis com pequenos concentradores anidólicos associados a lentes de Fresnel no topo de cada feixe de fibra óptica (Figura 16). Os raios, chegando ao ambiente através da fibra, são difundidos por difusores anidólicos ou por placas de difusão (SANTOS, 2009).

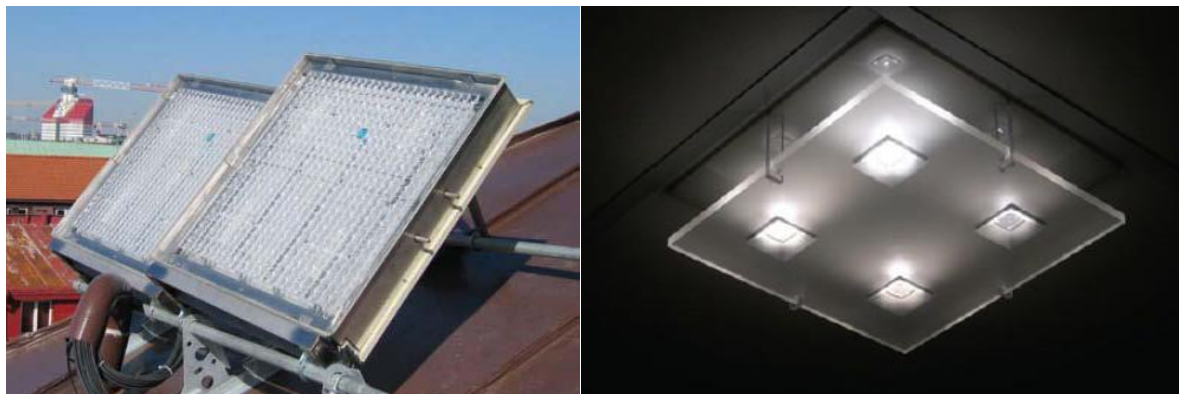


Figura 16 - Painel coletor de luz solar com captadores móveis eletronicamente e sistema de difusão da luz no ambiente interno por meio de placa difusora

Fonte: Espacio Solar, 2016

O seu desempenho está diretamente relacionado com a posição dos captadores e sua automação, bem como o comprimento dos cabos ópticos. As placas captadoras devem estar voltadas para orientações onde há maiores períodos de incidência de luz solar direta, sendo necessária a utilização de luz artificial complementar em casos de sol encoberto.

Estudos computacionais utilizando concentradores de luz natural com fibra ótica desenvolvidos por Oh *et al* (2013) mostram que os concentradores possuem melhor funcionamento quando os raios luminosos incidem sobre sua superfície com ângulos menores que 50° em relação à normal do plano. Os resultados apontam ainda que a distribuição da luz no interior do ambiente, mesmo para fibras óticas de até 8m, é semelhante nas diversas configurações estudadas.

2.3.3.9 Materiais Isolantes Transparentes – Aerogel

Alguns materiais utilizados para promover isolamento térmico em edificações podem ser utilizados também com a função de proporcionar conforto luminoso para o usuário da edificação. O aerogel (Figura 17) é um exemplo de elemento utilizado no campo térmico, acústico e luminoso. Esse material é uma estrutura de partículas de sílica amorfa altamente porosa, permitindo a transmissão de luz enquanto isola acústica e termicamente o ambiente (SANTOS, 2009). Possui características ópticas importantes, como a resistência aos raios

ultravioletas, o que evita o amarelamento ao longo do tempo, a resistência ao calor e às altas temperaturas, bem como a flexibilidade e a possibilidade de moldagem em diversos formatos (BURATTI e MORETTI, 2011). Sua principal característica óptica é a proteção solar contra raios diretos, do céu e do sol, convertendo-os para o usuário em uma grande superfície iluminada de forma difusa.

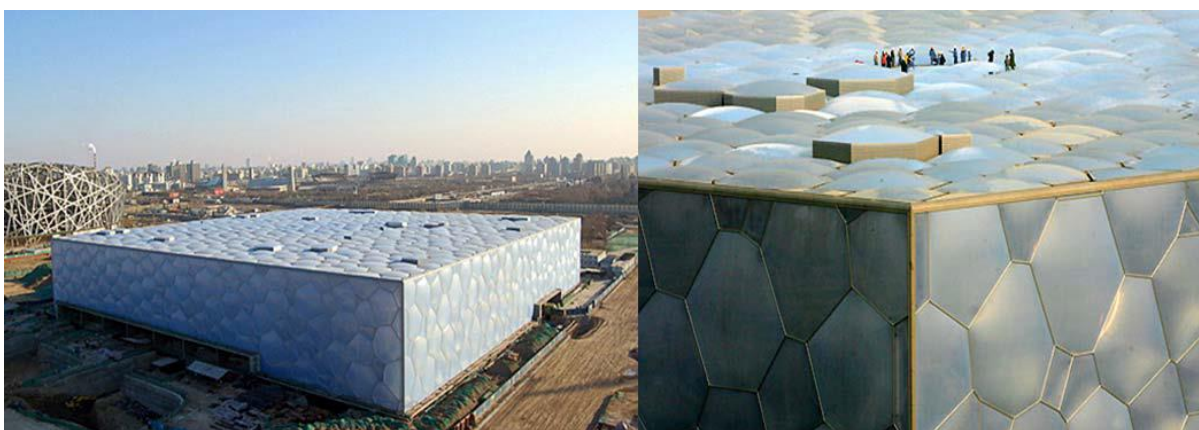


Figura 17 - Centro Nacional Aquático construído para os Jogos Olímpicos de 2008 em Beijing. Estruturas com isolamento interno em aerogel
Fonte: Ziger Projects, 2016

Estudos realizados em laboratório por Schultz et al. (2005) comparando o aerogel a outros fechamentos – como vidros simples, duplos e pigmentados – apontam que algumas janelas com essa tecnologia conseguem atingir uma transmitância luminosa de até 75%, com ganhos térmicos de 6 a 8% menores, se comparados com os demais materiais.

2.3.3.10 Sistemas Dinâmicos de Controle da Luz Natural (SDCLN)

Os SDCLN, são elementos formados por polímeros, principalmente o polydimethylsiloxano, para gerar microestruturas em camadas paralelas, semelhante a um brise. Essas, em formato de canal dentro do elemento, permitem que sejam adicionados fluidos de forma a alterar suas características de transmitância (Figura 18).

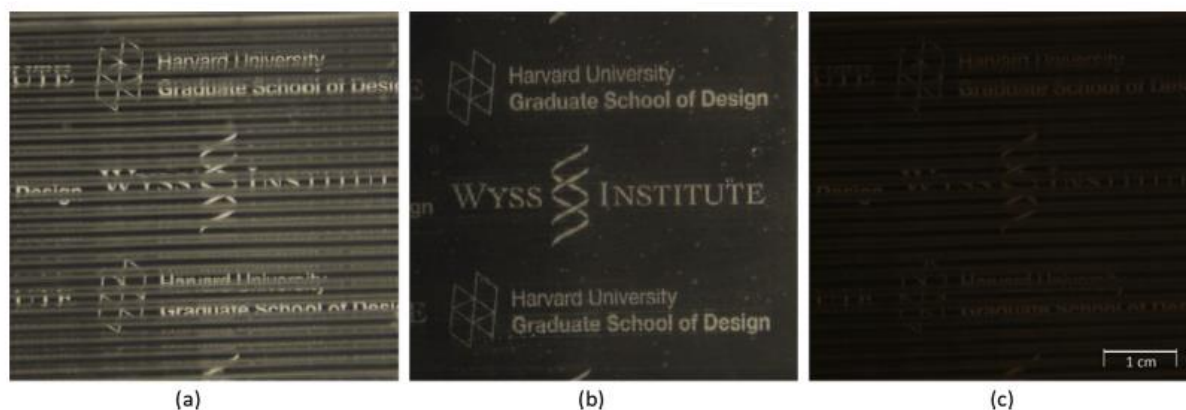


Figura 18 - Mudança na transmitância do material quando é inserido em seus canais: ar (a), líquido com densidade igual à do polímero (b) e líquido com pigmento preto (c)

Fonte: PARK et al. 2014

Os painéis são inseridos entre duas camadas de vidro e ao mover paralelamente as camadas o painel se deforma mudando o formato dos canais, como mostra a Figura 19, alterando a forma como ele interage com a luz. Os desenvolvedores do material propõem diversos sistemas para gerar sua deformação de forma controlada, bem como a inserção do fluido modificador da visibilidade. O sistema pode ser aplicado em substituição a janelas comuns, e tem atingido bons resultados no bloqueio da luz direta do sol e na transmissão difusa da luz solar (PARK *et al.* 2014)

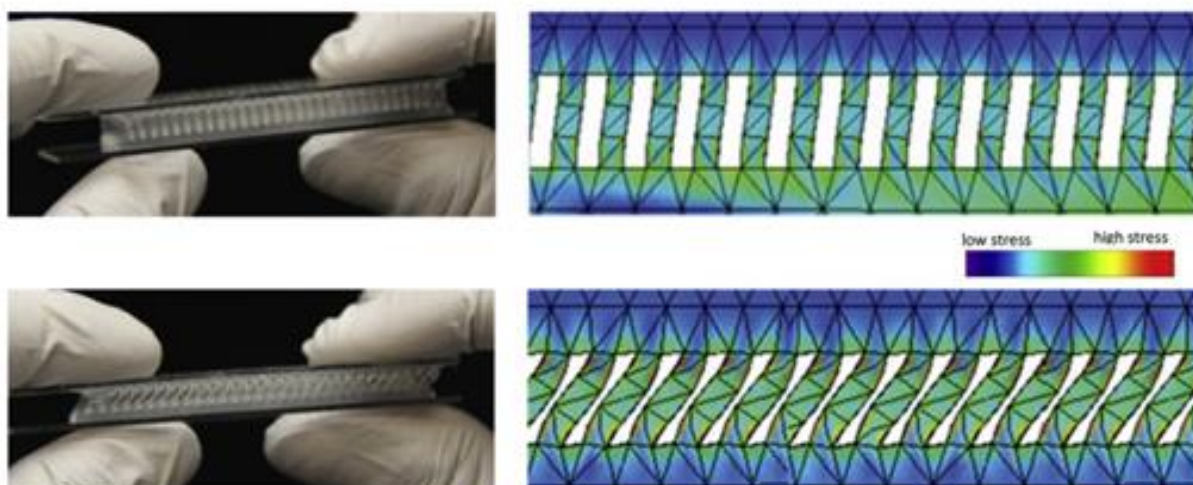


Figura 19 - Deformação provocada no DDCS, é possível observar como as superfícies paralelas de reflexão mudam de ângulo com a deformação

Fonte: PARK et al. 2014

2.3.3.11 O *Laser Cut Panel* – Painel de Corte a Laser (PCL)

Os dispositivos tradicionais de redirecionamento têm dificuldade em refletir a luz para porções mais profundas do ambiente, e mesmo os dispositivos avançados esbarram no bloqueio da visão do exterior e pela complexidade de aplicação. O PCL surge com uma proposta de elemento que busca resolver a problemática abordada, defletindo a luz para porções mais distantes da janela sem que a visão externa seja totalmente perdida (Figura 20). O PCL foi desenvolvido pelo engenheiro Ian R. Edmonds, em 1989, e patenteado por ele nos Estados Unidos no ano de 1991 (EDMONDS, 1991). Tal elemento consiste em uma placa de acrílico onde são feitos cortes paralelos com um cortador a laser, fundindo-o em uma superfície altamente reflexiva que gera o efeito de reflexão total interna⁵. Os cortes podem ser angulados ou perpendiculares à superfície (EDMONDS, 1993).



Figura 20 - *Painel de corte a laser*, com vista desobstruída através do elemento.
Fonte: Solartan, 2016

Sua aplicação não obstrui a visão externa, podendo ser utilizado também no nível do usuário, entretanto ele é usualmente posicionado à parte superior da janela, em uma proporção de 1/3 da altura da janela (LABIB, 2012). Pode ainda ser aplicado em estruturas móveis projetantes, onde o usuário poderá regular, conforme a necessidade, o ângulo de reflexão (Figura 21). Comumente a placa de acrílico é colocada na esquadria entre duas placas de vidro, de forma a protegê-la das intempéries e das partículas de sujeira que possam se acumular nas ranhuras.

⁵ Ver Anexo A



Figura 21 - Aplicação de um painel de corte a laser em uma escola na cidade de Brisbane, Austrália. Os painéis estão aplicados nas janelas altas.

Fonte: Solartran, 2016

Estudos preliminares de Edmonds (1993) apontam que 90% da luz incidente no painel, para alturas solares maiores que 45°, é defletida em direção ao teto do ambiente, 2% atravessa o painel de forma direta e 8% é defletida para o solo, externamente.

Os raios luminosos, ao incidirem no painel, podem ser defletidos pela superfície de corte para o interior do ambiente com perdas mínimas, pelo efeito da reflexão total interna⁶, ou poderá atravessar o material na mesma direção. Os raios defletidos para o interior, quando o corte é angulado, sairão pela outra face do material com ângulo diferente do de entrada, permitindo que o corte seja ajustado de forma a obter o maior ganho luminoso (CIAMPINI, 2005).

A forma como o elemento interage com a luz está relacionada com alguns parâmetros do elemento, como a inclinação do corte nas placas, a espessura do material, a distância entre os cortes e o índice de refração do material. A principal característica que define o painel é a relação entre distância dos cortes e espessura do material (D/W) (Figura 22). A ponderação de tais elementos, utilizando-se das formulações propostas por Edmonds (1993), permitem que o PCL seja dimensionado de forma a não causar ofuscamento ao usuário.

⁶ Ver Anexo A

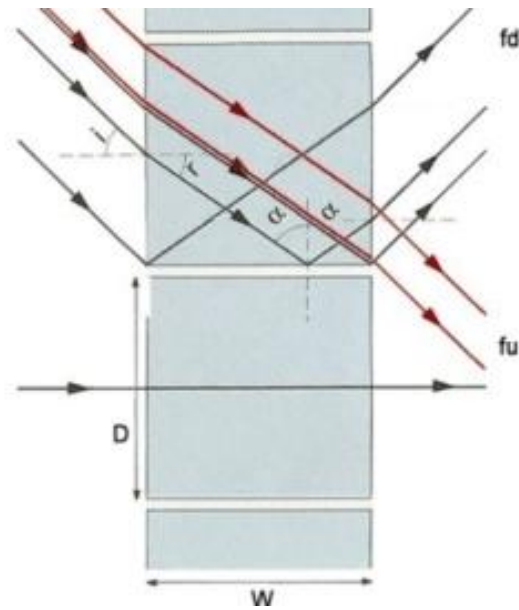


Figura 22 - Comportamento dos raios luminosos ao incidir no PCL
Fonte: SANTOS, 2009

Edmonds (1993) apresenta diversas formulações para prever o comportamento dos raios de luz no elemento tendo em vista as características já citadas. Diante dos diversos cálculos apontados pelo autor, ele chega a uma relação entre a fração de luz defletida pelo painel para dentro do ambiente. A Figura 23 mostra as frações de luz que são defletidas pelo material para o interior do ambiente em diferentes ângulos de corte. Percebe-se, por exemplo, que para uma razão D/W de 0,5 o ângulo de incidência em que 100% da luz é defletida para o interior é de 40° . No caso de painéis com corte angulado há um intervalo em que o efeito acontece. Para um painel com ângulo de corte de 7° e relação D/W de 0,5, a luz incidente com ângulo entre 50° e 57° será totalmente defletida, e para 0,7 de razão D/W , ângulos entre 70° e 90° serão totalmente defletidos.

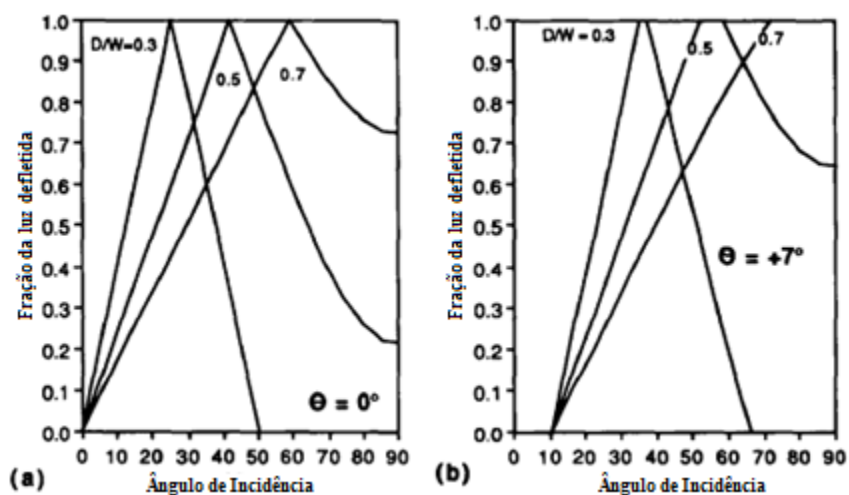


Figura 23 - Fração da luz incidente que é defletida pelo PCL para ângulo de corte 0° (horizontal) e 7° (inclinado para o interior do ambiente), para diferentes razões de D/W.

Fonte: EDMONDS, 1993

Alguns estudos apontam que a utilização de painéis de redirecionamento da luz em aberturas laterais reduz a incidência de luz direta do sol na área próxima da janela, aumenta a luz difusa no primeiro terço da sala mais próximo à janela e melhora a distribuição total de luz no ambiente. O painel ainda pode ser combinado de forma a produzir outro elemento, o painel canal (Figura 24). Ao combinar dois PCL com os cortes realizados em um ângulo diferente do horizontal, cria-se o painel canal, um dispositivo que permite não só o redirecionamento da luz natural, mas promove uma maior proteção solar próxima à parede se comparado ao modelo simples.

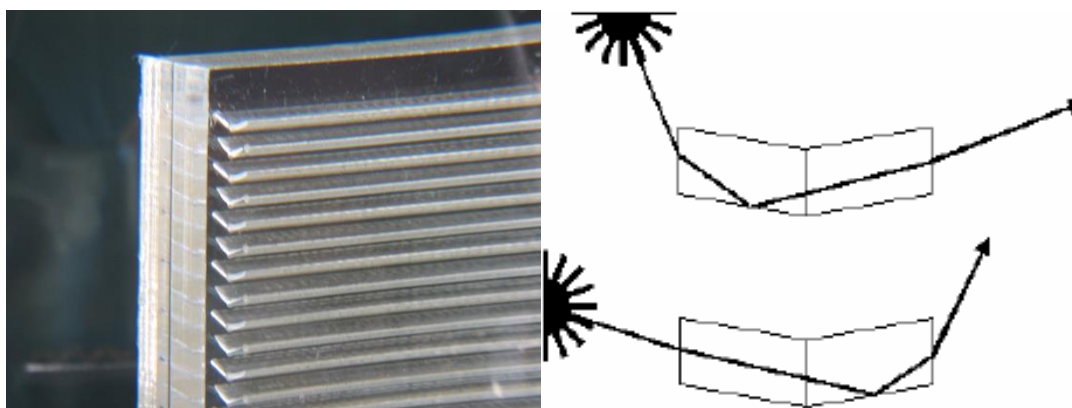


Figura 24 - Exemplo de painel canal e representação do funcionamento do painel canal para diferentes alturas solares.

Fonte: CIAMPINI, 2005

Os estudos iniciais de Edmonds (1993) apontam que o painel possui melhor funcionamento sob condições de céu claro, posicionado com os cortes na horizontal, e em um ângulo de inclinação correspondente à metade da altura solar máxima. Ainda assim ele indica

que há uma considerável redução da visão externa pelo painel, de até 50% quando posicionado a 60°. Para o autor, a principal característica a ser analisada é o risco de ofuscamento pelo material. Segundo ele, o painel não deve ser instalado no nível da visão do usuário.

Ainda é proposta por Edmonds (1993) uma formulação para a aplicação do painel, independente da orientação, apresentada na Equação 1.

$$\Theta_{\text{painel}} = \frac{1}{2}(E - 8^\circ) \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

E - Elevação solar máxima;

Θ_{painel} - Ângulo de aplicação do elemento na janela em relação à vertical, com eixo na parte superior.

Para regiões de cânion urbano o autor sugere que o painel seja aplicado a 30° com relação à vertical.

Laar (2001), ao comparar o PCL com outro tipo de elemento avançado, o plexiglass, cita que o ganho em iluminância com o PCL supera o do outro material, diminuindo os gastos com energia elétrica para iluminação artificial. O funcionamento quanto à iluminação natural para céus reais de diversos sistemas avançados em iluminação natural, como o PCL, o painel canal e o vidro prismático, foi analisado por Ciampini (2005). A autora conclui que o painel canal obteve os melhores resultados, promovendo uma distribuição de iluminância homogênea, gerando baixos níveis de contraste nas superfícies iluminadas pelos raios defletidos. Os resultados de Ciampini (2005) foram confirmados por Santos (2009), só que para céus de climas subtropicais.

Estudos em ambientes reais, como o realizado por Labib (2012) apontaram que o sistema PCL mostrou-se de simples aplicação, em substituição à janela comum já existente, e que sua aplicação resultou em ganhos expressivos, no caso de estudo, em salas de aula. A autora mostra que o funcionamento é melhor sob condições de céus claros e parcialmente encobertos, e que em condições de céu encoberto há uma perda na iluminância do ambiente, entretanto não foi observado desconforto por ofuscamento, tendo em vista a altura em que o PCL foi aplicado.

2.4 Simulação Computacional

A utilização de simulação computacional tem tomado cada vez mais um papel de destaque no estudo e avaliação de soluções arquitetônicas ligadas ao conforto ambiental, no âmbito de pesquisa e de projeto. As técnicas utilizadas pelos *softwares* de simulação vêm sendo constantemente revistas, atualizadas e aprimoradas de forma a fornecer maior credibilidade e fidelidade aos resultados obtidos. Watt (2000) aponta que a partir de 1980 os modelos computacionais que trabalham com luz, seja natural ou artificial, tiveram um importante avanço, resultando naqueles utilizados atualmente.

Diante desse cenário, Baker e Steemers (2005) apontam que, mesmo com a grande disponibilidade de programas, a incorporação deles nos escritórios de arquitetura ainda não é algo comum, tendo em vista a complexidade das ferramentas e os custos computacionais que uma escolha errada de *software* pode gerar. A sua grande diversidade faz com que o usuário não disponha de critérios suficientes para escolhê-los e os resultados que eles se propõem a dar por vezes requerem um custo computacional alto – e que não atendem às necessidades de usuários específicos, fazendo com que a distância entre *softwares* e escritórios de arquitetura continue a crescer. Segundo a IEA (2000), apenas 15% dos arquitetos ocupavam-se em assuntos relativos à iluminação natural nos seus projetos na Europa.

Mesmo diante de tais diferenças, há algumas características que são comuns a todos os *softwares* e alguns tipos de resultados que são fundamentais a qualquer análise. Os dados de entrada dos *softwares* são comumente semelhantes, diferindo apenas a forma de definição geométrica. Algumas metodologias de cálculo precisam que as superfícies sejam discretizadas em pedaços menores, como no caso daqueles que utilizam o método da radiosidade⁷, já outros não necessitam de tal discretização. As características ópticas dos materiais, relativas à reflexão e transmissão, difusa e especular, são definidas para cada superfície individualmente. O modelo pode ou não contar com condições de entorno definidas, a depender da necessidade do usuário e do objetivo do estudo.

A descrição das fontes de luz natural para simulação computacional pode ser feita de duas formas. Os softwares que utilizam o método do raio traçado⁸ baseiam-se comumente nos 15 tipos de céu descritos pela CIE (CIE, 2002), que variam entre cinco tipos de céu claro, cinco

⁷ Ver seção 2.4.1

⁸ Ver seção 2.4.2

parcialmente nublados e cinco encobertos (Tabela 1). A norma da CIE estabelece formulas para a distribuição de luminâncias da abóbada celeste para cada tipo de céu. Tregenza e Sharples (1993) apontam algumas formulações adicionais para tratar de turbidez local, poluição do ar e a atenuação dos raios solares devido à posição relativa do sol.

Tabela 1 - Classificação dos tipos de céu proposta pela CIE

Tipo	Descrição	Tipo	Descrição
1	Céu encoberto - Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e uniformidade azimutal	9	Parcialmente encoberto – com obstrução
2	Encoberto - Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e brilho moderado ao redor do sol	10	Parcialmente encoberto – com uma região circunsolar brilhosa
3	Encoberto - Gradação de luminâncias moderada com uniformidade azimutal	11	Céu branco-azul com coroa solar distinta
4	Encoberto - Gradação de luminâncias moderada e brilho moderado ao redor do sol	12	CIE Padrão de Céu claro com baixa turbidez
5	Céu de luminâncias uniformes	13	CIE Padrão de Céu claro com atmosfera poluída
6	Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar com brilho moderado ao redor do sol	14	Céu túrbido sem nuvens com ampla coroa solar
7	Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar e com uma região circunsolar brilhosa	15	Céu branco-azul túrbido com ampla coroa solar
8	Parcialmente encoberto – Sem gradação em função da altura solar e com uma coroa solar distinta		

Fonte: CIE, 2002

Para os *softwares* que utilizam o método da radiosidade⁹ comumente são utilizados os modelos de céu descritos por Perez et al. (1993). Tal método utiliza uma formulação para descrever a distribuição de luminâncias do céu segundo diversos fatores, como luminância do zênite, do horizonte, da região próxima ao sol, entre outros.

Duas metodologias de cálculo são amplamente utilizadas nos softwares e permitem calcular a iluminância e a luminância dos ambientes com precisão, como apresentado anteriormente: a da radiosidade e a do raio traçado. Há programas que combinam as duas metodologias para obter maior amplitude de resultados. Os resultados que cada *software* e as limitações de cada método de cálculo diferem entre si, mas possuem algumas convergências. *Softwares* que se utilizam apenas do método do raio traçado, por exemplo, comumente apresentam apenas resultados quantitativos, a iluminância em pontos de leitura, enquanto

⁹ Ver seção 2.4.1

outros, com metodologias como a da radiosidade, permitem representações gráficas em três dimensões.

2.4.1 Radiosidade

O método da Radiosidade se baseia na troca energética entre as superfícies e deriva do cálculo das trocas de radiação térmica empregado na transmissão de calor, e adaptado para a computação gráfica (LOPES, 2009). Quando aplicado à iluminação, a troca energética é abordada como troca luminosa entre superfícies perfeitamente difusas, sendo que geralmente é tratada por métodos de elementos finitos (CLARO, 1998). Esse método tem como base o conceito de fator de forma que, segundo Tregenza (1993), é a fração de radiação que deixa um elemento de superfície finita e atinge outro. As formulações para cálculo do fator de forma entre superfícies simples está bem definida por Siegel e Howell (1972), entretanto para modelos complexos a formulação envolve integrais múltiplas, o que onera o custo computacional de tais métodos.

Alguns pontos positivos do método da Radiosidade podem ser apresentados, conforme Watt (2000), como a capacidade de simular com precisão interreflexões e a possibilidade de gerar cenas independente do posicionamento do observador. Alguns pontos negativos podem ser apontados, como a dificuldade em processar geometrias complexas, abordar transparência, colisão especular e o cálculo com variação de tipo de céu, hora e azimute. Alguns *softwares* que utilizam o método da radiosidade são o Radiance®, o Relux®, Dialux®, LightCalc® e o Apolux. Esse último, desenvolvido por Claro (2005), bem como os demais permitem que sejam simulados ambientes para iluminação natural e artificial.

2.4.2 Raio Traçado (*Ray Tracing*)

O *ray tracing*, ou Raio Traçado, foi originalmente desenvolvido para utilização em computação gráfica, para gerar imagens de objetos modelados computacionalmente. Glassner (1989) explica que no raio traçado são necessários alguns elementos a fim de formar a imagem: inicialmente, um ponto de origem é adotado na posição do observador, o segundo é um plano

de visão entre o observador e o objeto, como um filme que gravará as informações do raio de luz e por último o objeto ao qual os raios são direcionados.

Cabús (2005) aponta alguns pontos positivos do método, tais como a facilidade em lidar com geometrias complexas, e com o fenômeno da colisão especular. Entretanto, quando tratados materiais difusos, o processamento computacional demanda muito tempo, o que pode ser solucionado com o auxílio de algumas ferramentas complementares, a exemplo do método Monte Carlo. Alguns *softwares*, como o TropLux®, desenvolvido por Cabús (2002), e o LightScape®, utilizam o raio traçado para calcular a disponibilidade de luz natural nos ambientes internos. *Softwares* como o Radiance® e o DaySim® possuem alguns módulos que combinam as duas metodologias de cálculo para gerar dados quantitativos e qualitativos.

2.4.3 O *Software* TropLux

O *software* de simulação em iluminação natural TropLux foi desenvolvido por Cabús (2002) e vem sendo constantemente atualizado e aprimorado pelo Grupo de Pesquisa em Iluminação – GRILU – da Universidade Federal de Alagoas. Tal *software* utiliza o método do raio traçado combinado com os coeficientes de luz natural (TREGENZA; WATERS, 1993) e o método Monte Carlo aplicado à iluminação natural (TREGENZA, 1983).

Seu código foi desenvolvido em MatLab® e utilizou os módulos de interface gráfica do próprio programa a fim de gerar um ambiente de trabalho prático para o usuário (CABÚS, 2005). O TropLux tem sido utilizado em trabalhos científicos como teses nacionais (LARANJA, 2010) e internacionais (HAREDY, 2016), dissertações (SOTO, 2010; NETTO, 2015), artigos em congressos locais (BASTOS; CABÚS, 2016), nacionais (PASSOS et al., 2014) e internacionais (CORREIA et al, 2008) e em revistas nacionais (MENDES et al., 2005) e internacionais (RAMOS; GHISI, 2010). O modelo computacional inserido no programa baseia-se em uma geometria formada por planos retangulares definidos pelas coordenadas de seus vértices, onde são definidas características como refletância e transmitância. A combinação de diversos planos permite a geração de geometrias complexas (Figura 25).

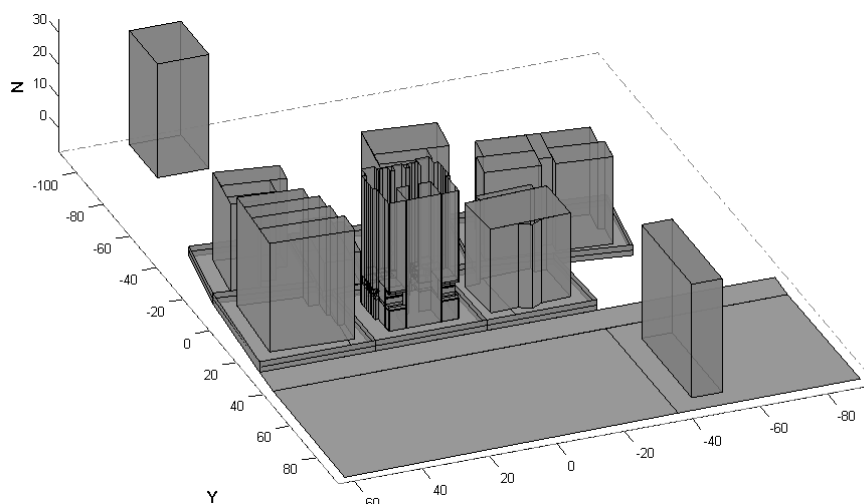


Figura 25 - Exemplo de geometria complexa processada utilizando o TropLux.

O *software* calcula as componentes de luz natural permitindo que os resultados sejam acessados separadamente ou para o conjunto de iluminância global. É possível estudar separadamente as componentes direta e difusa, do céu e do sol, e suas combinações (CABÚS, 2005).

2.4.3.1 Método Monte Carlo

Associado ao raio traçado, ferramenta base do TropLux, outras metodologias servem como complemento, fundamentando o modelo em alguns aspectos aos quais não há mecanismos suficientes para determinação. O método Monte Carlo funciona da seguinte forma: sabendo a probabilidade de ocorrência de cada evento de uma variável, é possível determinar a série de eventos possíveis dessa variável em que, ao emitir um valor aleatório em um intervalo predefinido dentro do conjunto de possibilidades, verifica-se qual evento acontecerá. Esse método é utilizado para determinar, por exemplo, o que ocorrerá quando um raio atinge um plano, pois sabendo as probabilidades de ele ser refletido ou transmitido, de forma especular ou difusa, é possível determinar quantos raios são necessários para que se atendam todas as probabilidades.

A utilização do método Monte Carlo é uma boa solução quando métodos analíticos comuns são computacionalmente dispendiosos. Sua aplicação permite que problemas multidimensionais, como a troca radiativa e o cálculo em geometrias complexas, sejam

facilitados (KALOS; WHITLOCK, 1986). Diversos autores, como Tregenza (1983, 2016) e IEA (1999), utilizam essa formulação para a aplicação em problemas relacionados à iluminação natural, determinando diretrizes para o seu uso em algoritmos ligados ao comportamento da luz (id., 1983).

2.4.3.2 Coeficientes de luz natural

Os coeficientes de luz natural propostos por Tregenza e Waters (1983) são valores que expressam a relação entre a iluminância em uma determinada superfície, i , a partir de uma determinada subdivisão do céu, e a iluminância horizontal difusa de um plano desobstruído a partir da mesma subdivisão. Sua formulação matemática é apresentada na equação 2.

$$d(i, j) = \frac{E_i(j)}{E_n(j)} = \frac{E_{i(j)}}{L_j w_j} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

L_j – luminância do setor j

w_j - área, em esterradiano, da subdivisão de céu j

Tais coeficientes são diretamente dependentes das características geométricas do modelo e das características ópticas dos materiais, entretanto são totalmente independentes da luminância do céu, e por consequência da orientação da abertura, dos dias e horas do ano. Para o cálculo dos coeficientes na componente difusa o TropLux, utiliza-se a divisão de céu de 145 partes proposta pela CIE (2002). Na componente direta, tendo em vista que a área que o sol ocupa na divisão de 145 é muito maior que a real, Cabús (2002) propõe uma divisão de 5221 partes para aumentar a precisão da posição solar.

2.5 Conclusão

A problemática da redução da visão de céu, e consequentemente na redução da disponibilidade de luz natural nas edificações, em cenários de adensamento urbano vem sendo tratada de forma muito recorrente pela literatura. As análises nesse sentido comumente

englobam situações onde os ambientes estão totalmente desprovidos de qualquer elemento que auxilie na melhoria da captação de luz natural.

Dessa forma, o uso de elementos prismáticos em janelas laterais já vem se consolidando como uma importante ferramenta de aproveitamento da luz natural. Entretanto, ainda há carência de diretrizes para a sua aplicação, tendo em vista o reduzido número de estudos realizados com tais materiais. Mesmo os estudos já realizados se limitam a uma avaliação qualitativa, normalmente em modelos em escala – e que não conseguem gerar respostas objetivas que auxiliem na utilização prática de tais elementos.

Outra limitação encontrada é a carência de *softwares* de simulação que permitam o estudo de tais elementos. Isso se dá principalmente pela complexidade como a luz interage com os materiais, fazendo com que sua caracterização computacional ainda não seja uma realidade. Para os elementos avançados prismáticos, como o painel de corte a laser e o vidro prismático, já são conhecidos os comportamentos, descritos pelos coeficientes de Fresnel, tornando possível a simulação computacional.

Uma das formas de estudo da aplicação dos painéis de corte a laser é a utilização de modelos em escala, sob condições de céu real ou artificial. Outra ferramenta importante é a simulação computacional. Entretanto, faz-se necessário o desenvolvimento de algoritmos que utilizem as formulações físicas já conhecidas em um *software* de simulação capaz de processá-las. Edmonds (2000) desenvolve algo semelhante, para o software Radiance®, entretanto a formulação utilizada por ele possui as limitações impostas ao usuário de um *software*, e não de seu programador.

Diante de tais limitações, o desenvolvimento de um algoritmo que consiga simular com fidelidade os elementos prismáticos a partir da formulação física conhecida, e que permita a análise desses cenários urbanos adensados, faz-se necessária. O estudo de como a visão de céu afeta na aplicação do painel de corte a laser utilizando-se de ferramenta computacional será, então, objeto de estudo para as próximas etapas do trabalho.

3. FERRAMENTAS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as ferramentas e métodos necessários à resolução dos objetivos propostos para o trabalho. O conjunto de métodos para obtenção dos resultados é dividido em duas etapas principais: a primeira consiste no desenvolvimento do algoritmo para simulação computacional do elemento e sua posterior validação, a segunda etapa engloba a modelagem computacional de cenários urbanos para aplicação do painel de corte a laser, a simulação computacional e a análise dos resultados, conforme apresentado na Figura 26.

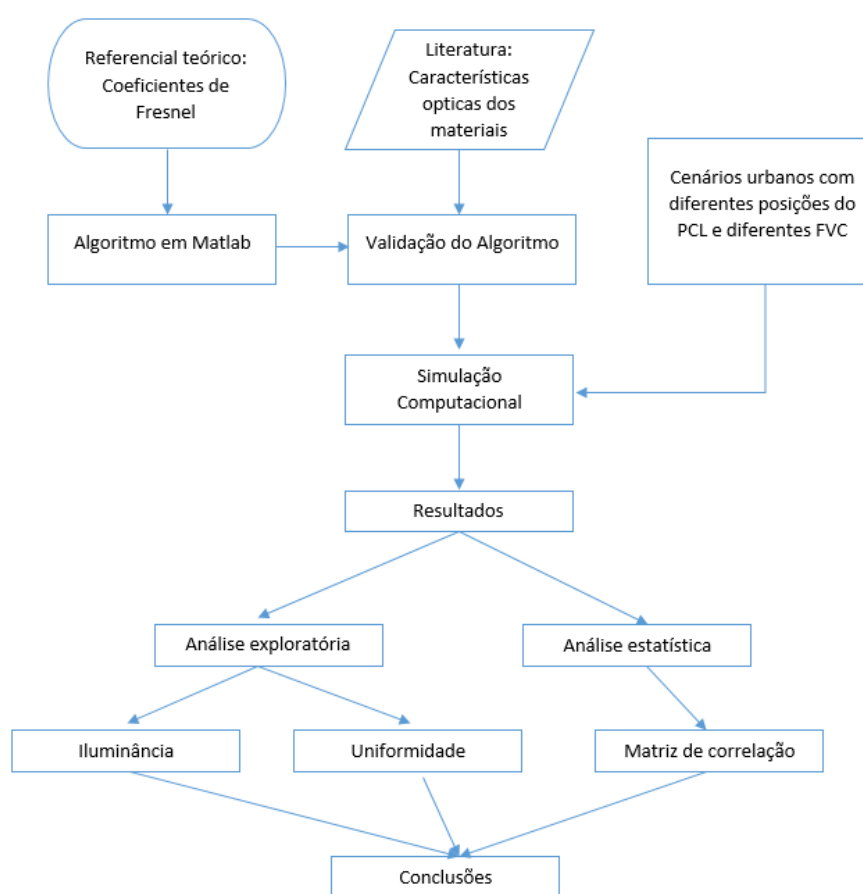


Figura 26 - Fluxograma de etapas metodológicas do trabalho

3.1 Algoritmo Computacional

Para que o desempenho de um dispositivo avançado em iluminação natural possa ser avaliado, é necessário que a ferramenta computacional esteja capacitada a simular as características ópticas do material em questão. Algumas características básicas como a

refletância e a transmitância dos materiais são facilmente inseridas em todos os *softwares* de simulação, entretanto apenas alguns permitem ir além disso. O efeito de refração dos raios luminosos, normalmente, não é devidamente computado em ferramentas simplificadas, tendo em vista a sua pouca influência no desempenho luminoso de ambientes com vidro comum. Como apresentado anteriormente, a refletância e a transmitância de materiais translúcidos estão diretamente relacionadas com o ângulo incidência do raio luminoso.

3.1.1 Desenvolvimento

A análise das possíveis formulações utilizadas é apresentada no Anexo B. A formulação inicial apresentada por Hecht (2002), e que foi complementada para melhor definição no algoritmo, é apresentada nas equações 3 e 4.

$$r_{perpendicular} = \frac{n_i \cos \Theta_i - n_t \cos \Theta_t}{n_i \cos \Theta_i + n_t \cos \Theta_t} \quad [\text{Eq. 3}]$$

$$r_{paralelo} = \frac{n_i \cos \Theta_t - n_t \cos \Theta_i}{n_i \cos \Theta_t + n_t \cos \Theta_i} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde:

$r_{perpendicular}$ – Refletância do plano em que o raio incide para a onda eletromagnética perpendicular ao plano que contém o raio

$r_{paralelo}$ – Refletância do plano em que o raio incide para a onda eletromagnética paralela ao plano que contém o raio

Θ_i – Ângulo de incidência do raio luminoso com relação à normal do plano incidente

Θ_t – Ângulo de transmissão do raio luminoso com relação à normal do plano incidente

n_i – Índice de refração do meio que contém o raio incidente

n_t – Índice de refração do meio que contém o raio transmitido

O detalhamento da formulação física, bem como a explicação das polarizações perpendicular e paralela, está descrito no Anexo A. Para que tal formulação possa ser utilizada no cálculo da refletância é necessário conhecer os ângulos de incidência e transmissão do raio luminoso. Tal cálculo é realizado quando o raio luminoso atinge um plano do modelo, não sendo conhecido ainda o seu ângulo de transmissão. Para tanto faz-se necessário seu cálculo utilizando-se da lei de Snell, apresentada na equação 5, combinada à lei da trigonometria apresentada na equação 6.

$$\sin \theta_t = \frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i \quad [\text{Eq. 5}]$$

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - (\sin \theta_t)^2} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Resulta que:

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i\right)^2} \quad [\text{Eq. 7}]$$

Logo, substituindo a equação 7 nas equações 3 e 4, obtém-se uma fórmula que tem como parâmetros apenas os índices de refração dos meios e o ângulo de incidência do raio luminoso, como apresentado nas equações 8 e 9, e possíveis de serem implementadas no algoritmo.

$$r_{\text{perpendicular}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i\right)^2}}{n_i \cos \theta_i + n_t \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i\right)^2}} \quad [\text{Eq. 8}]$$

$$r_{\text{paralelo}} = \frac{n_i \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i\right)^2} - n_t \cos \theta_i}{n_i \sqrt{1 - \left(\frac{n_i}{n_t} \times \sin \theta_i\right)^2} + n_t \cos \theta_i} \quad [\text{Eq. 9}]$$

Tendo como base as formulas para as características direcionais, faz-se necessário ainda calcular o ângulo de refração do raio luminoso para cada ângulo de incidência. Por Glassner (1989), a relação entre o ângulo do raio incidente e refratado é dada na equação 10.

$$v_r = r * l + n(r \cos \theta_i - \sqrt{1 - \sin(\theta_t)^2}) \quad [\text{Eq. 10}]$$

Onde,

$v_r = \text{Vetor Refratado}$;

$$r = \frac{n_i}{n_t}$$

$l = \text{Vetor Incidente}$

$n = \text{Vetor Normal do Plano}$

Utilizando a lei de Snell apresentada na equação 5, de forma a eliminar da equação a variável do ângulo do raio transmitido, obtém-se a formulação apresentada na equação 11. De onde resulta que o vetor refratado, dado em termo de seus cossenos diretores.

$$L'_r = \frac{n_1}{n_2} * l + n \left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \times \sin \theta_i\right)^2} \right) \quad [\text{Eq. 11}]$$

Para o vetor refletido, onde o ângulo de reflexão é igual ao de incidência, utiliza-se a formulação dada por Greve (2006), onde temos que a relação entre o ângulo do raio incidente e refletido, apresentada na equação 12.

$$r = i - 2(i * n)n \quad [\text{Eq. 12}]$$

Onde, pela notação utilizada, tem-se que:

$$r = L'_r = \text{Raio Refletido}$$

$$i = L' = \text{Raio Incidente}$$

$$n = n' = \text{Normal do Plano}$$

Logo:

$$L'_r = L' - 2(L' * n') * n' \quad [\text{Eq. 13}]$$

Tendo a formulação teórica necessária para o algoritmo ser desenvolvido, tal desenvolvimento foi desenvolvido em linguagem MatLab® compatível com a lógica computacional utilizada no TropLux, e inserido no modulo do *Ray Tracing* de forma que o raio, ao atingir a superfície no PCL, seja tratado a partir desta nova formulação.

3.1.2 Análise dos Resultados e Validação

Para a validação do algoritmo, é importante notar que o software TropLux já foi anteriormente validado por Cabús (2005), e sua eficácia atestada nos diversos trabalhos acadêmicos em que foi utilizado, fazendo com que não seja necessária a sua validação, visto que as novas funções não o modificam, mas apenas complementam um caso particular. Para a validação das novas funções, faz-se necessário verificar as características de transmitância e refletância direcionais obtidas no algoritmo para diferentes elementos avançados e compará-las com outros resultados já encontradas na literatura.

Inicialmente, será utilizado um dos modelos previstos de análise global para a verificação do funcionamento do algoritmo, como apresentado na seção 3.2, a fim de identificar o comportamento das componentes direta e difusa com a aplicação do PCL. O modelo não contará com a condição de entorno, limitando-se a um ambiente com abertura e outro com a aplicação do PCL na posição vertical. Deverão ser gerados diagramas de contribuição do céu em 145 partes para a componente difusa e em 5221 partes para a componente direta, para pontos a distantes 1, 3 e 5 metros da abertura, na altura do plano de trabalho.

Posteriormente, serão realizadas as verificações do comportamento fotométrico dos materiais quanto à transmitância e refletância direcional. Para tanto, serão comparados os comportamentos de três elementos: o vidro comum, o vidro prismático tipo 45/45 e o painel de corte a laser com relação D/W de 0,3. Será emitido um conjunto de raios luminosos sobre o elemento no modelo computacional e verificada a quantidade dos raios transmitidos e refletidos para o exterior e defletidos. Os referenciais utilizados nas comparações para cada tipo de material estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Referenciais teóricos utilizados nas comparações para validação do algoritmo

Material	Referencial na Literatura	Metodologia utilizada
Vidro Comum	Edmonds (2000)	Valores calculados a partir de formulação desenvolvida pelo autor para a simulação de elementos de vidro com faces paralelas para o software Radiance ®
	Tregenza (1993)	Valores calculados a partir de formulação desenvolvida pelo autor a partir dos dados obtidos por Mitalas e Arseneault (1968) para transmitância direcional de vidros planos
Vidro Prismático	Laouadi et al. (2012)	Simulação computacional pelo método do raio traçado, entretanto sua abordagem na interação entre o raio e as superfícies do elemento não utilizam os coeficientes de Fresnel, mas uma distribuição de probabilidades de eventos a partir de medições realizadas em laboratório com um goniofotômetro
	Andersen et al. (2004) (a)	Dados obtidos a partir de um goniofotômetro em laboratório
	Andersen et al. (2004) (b)	Dados obtidos a partir de uma esfera integradora utilizando câmeras CCD ¹⁰ em laboratório pelo método do BTDF ¹¹
Painel de Corte a Laser	IEA (1999) (a)	Dados obtidos a partir de uma esfera integradora utilizando um receptor fotoelétrico no laboratório TUB, no <i>Swiss Federal Institute of Technology</i>
	IEA (1999) (b)	Dados obtidos a partir de uma esfera integradora utilizando um receptor fotoelétrico no laboratório LESO, no <i>Solar Energy and Building Physics Laboratory</i>

¹⁰ CCD - *charge-coupled device*: é um sensor semiconductor para captação de imagens formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados.

¹¹ BTDF - *bidirectional scattering distribution function*: Conjunto de funções matemáticas que descrevem o Comportamento de um feixe de luz incidindo em uma superfície a partir de uma distribuição de probabilidades de eventos.

Os resultados serão apresentados em um diagrama semelhante ao da Figura 13, em um gráfico radial onde serão apresentadas a transmitância e a refletância para cada ângulo de incidência dos raios luminosos. Os dados serão comparados ainda em uma regressão linear para verificar a correspondência entre os valores da literatura e os obtidos pelo modelo.

Por fim, será analisada a porção de luz defletida pelo painel de corte a laser. Edmonds (1993), utilizando medições sob condição de céu real encoberto, conseguiu calcular o percentual da luz transmitida pelo elemento que era defletida, disponibilizando os resultados que serão comparados com os do algoritmo desenvolvido.

3.2 Modelos Urbanos

Para que seja avaliada a relação entre os fatores de visão de céu propostos e o ângulo de aplicação do PCL, faz-se necessária a sua variação dentro de um cenário de adensamento urbano para a cidade de Maceió. Para atingir variações suficientes, e em um conjunto com amplitude expressiva dos fatores, foi definido um cenário urbano fixo, possível dentro do código de obras, e variada a posição do ambiente, de forma a obter valores de SVF distintos.

É importante ressaltar que o cenário urbano serve apenas como referência para alcançar os valores de fator de visão de céu necessários para a análise. Não é objetivo do presente trabalho discorrer sobre a dos parâmetros urbanos no PCL, e sim sua consequência direta na visão de céu e no comportamento do elemento. O modelo urbano desenvolvido permite verificar que valores de FVC são possíveis de serem encontrados em situações reais na cidade de Maceió.

3.2.1 Desenvolvimento

Para o modelo urbano foram utilizados como base os parâmetros descritos por Lima (2015) em sua análise da disponibilidade de luz natural em zonas ainda não consolidadas de Maceió: largura da via, altura da edificação obstruidora, afastamentos laterais e frontais das edificações e altura do ambiente.

A região escolhida para o estudo compreende a ZR-4 (Zona Residencial 4) – que engloba os bairros de Ponta Verde, Pajuçara, Jatiúca e uma porção de Cruz das Almas. Alguns desses

bairros, como a Ponta Verde, já possuem uma densidade de edificações alta, como apontado por Barbosa (2009), resultando em problemas quanto à disponibilidade de luz natural. Os parâmetros urbanos utilizados foram obtidos do Código de Urbanismo e Edificações da cidade de Maceió – Lei Municipal 5.593/07 (MACEIÓ, 2007) para a ZR4, e para edificações residenciais multifamiliares, UR-5.

São permitidas para a cidade de Maceió quatro tipos de vias de rolamento, com as respectivas definições de calçada e canteiros. Para o presente estudo, foi fixada uma largura de via de 12m, que compreende 8m para a pista de rolamento e 2m de passeio de cada lado, por ser a mais estreita permitida, resultando em cenários com menor visão de céu.

Ainda segundo o código de edificação de Maceió (MACEIÓ, 2007), tem-se que, para edificações residenciais (UR-5), são permitidos edifícios de até 15 pavimentos, a uma taxa de ocupação de 35% e edifícios de 10 pavimentos para uma ocupação de terreno de 50% (Quadro 2). Apenas a situação com edificações com 10 pavimentos será estudada, tendo em vista o cenário urbano já consolidado presente na região.

Quadro 2 - Parâmetros Urbanísticos para Zona Residencial 4 (ZR-4).

Zonas	Usos	Taxa de Ocupação do Terreno Máxima	Altura Máxima da Edificação (nº de Pavtos)	Testada Mínima do Lote (m)	Área Mínima do Lote (m²)	Recuo Mínimo		Coeficiente de Aproveitamento do Terreno
						Frontal (m)	Laterais / Fundo (m)	
ZR-4	UR-1	70%	2	-	-	3,00		2,0
	UR-4	Para Condomínios horizontais, aplicam-se os critérios para o uso UR-1; Para condomínios verticais, aplicam-se os critérios definidos para o uso UR-5						
	UR-5	50%	10	-	-	3	1,5	4,0
		35%	15			$+\frac{n-2}{2}$	$+\frac{n-2}{2}$	
	Comércio, Serviços e Industrial – Grupos I, II, III e IV	70%	2(*5)	-	-	5(*6)	Art. 473	2,0

Fonte: Código de Urbanismo e Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei nº 5354/2007 (MACEIÓ, 2007)

Adotando a fórmula proposta no Quadro 2 para um edifício de 10 pavimentos, o afastamento frontal será de 7 m, os laterais e o posterior de 5,5m. Na Figura 27 é apresentado um exemplo da geometria urbana obtida utilizando-se os parâmetros escolhidos. Os edifícios que compõem a quadra possuem as mesmas dimensões daquele em que se localiza o ambiente de estudo, e são espaçados igualmente conforme os parâmetros apresentados no Quadro 3.

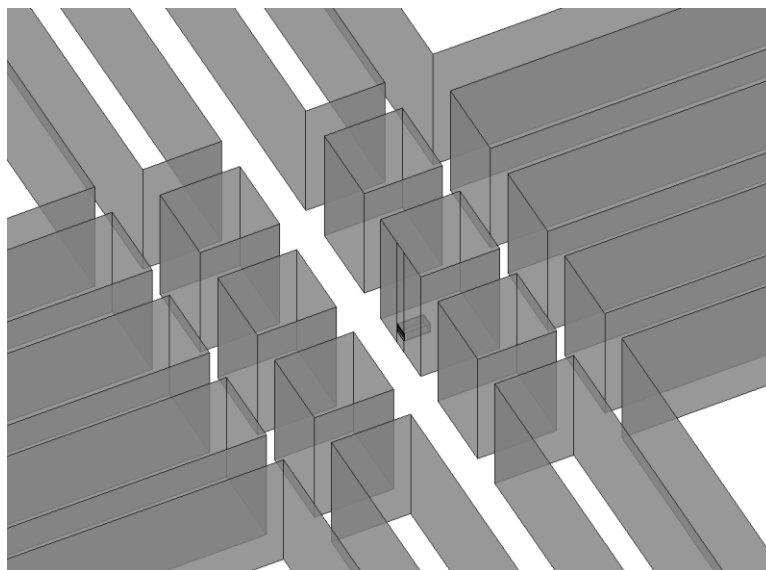


Figura 27 - Exemplo de modelo urbano utilizado nos processamentos

Para que as diversas situações de visão de céu sejam corretamente analisadas, são propostas três alturas do ambiente. A maioria das edificações localizadas na ZR-4 possuem um subsolo semienterrado e mais um pavimento com serviços comuns do condomínio, para iniciar os andares de apartamentos propriamente. Logo, os pavimentos escolhidos foram o primeiro andar, a 4,5m do nível da rua, no terceiro andar, a 10,5 m, e no quinto andar, a 19,5 m. O pavimento superior não será analisado, pois sua visão de céu é praticamente desobstruída, já sendo conhecido o comportamento do PCL, como apresentado na seção 2.3.3.11. Ciampini (2005) aponta que para o estudo do ganho em profundidade é interessante que os ambientes possuam uma relação de 1:2 entre largura e profundidade e que possuem pé-direito elevado. As dimensões do ambiente utilizado nas simulações são apresentadas na Figura 28.

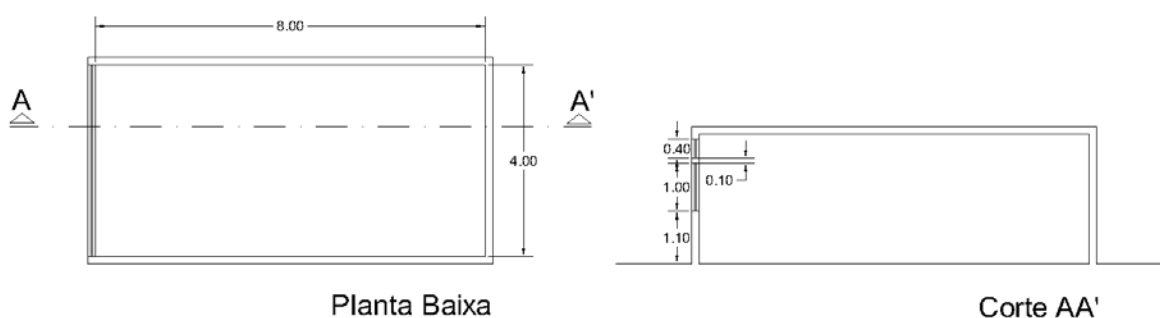


Figura 28 - Modelo do ambiente utilizado nos processamentos

Segundo IEA (2000), a aplicação de elementos de redirecionamento da luz natural é mais eficiente quando feita na parte mais alta da parede. Tendo em vista a grande quantidade de luz proveniente da janela inferior, atestada em trabalhos como Lima (2015) e Ribeiro (2016), o

estudo da influência do elemento superior fica prejudicado, pois os resultados elevados da janela inferior mascaram o comportamento da luz para o elemento. Para resolver a questão na janela inferior, será inserido um plano totalmente absorvente, de forma que os raios de luz advindos da janela não sejam computados, mas a existência da superfície envidraçada da janela não seja desprezada e tomada como uma superfície de parede¹².

As características dos materiais utilizados no ambiente foram obtidas através da tabela de refletância fornecida pelo TropLux, descritas na Tabela 2, obtida através dos estudos de Dornelles e Roriz (2007). A refletância de entorno foi definida segundo os estudos da tese de Laranja (2010), apresentando um valor médio utilizado comumente nas edificações.

Tabela 2 - Refletância das superfícies do modelo

Superfície	Material	Refletância Difusa
Piso	Concreto	0,40
Paredes	Tinta Suvinil PVA Branco Neve	0,85
Teto	Tinta Suvinil PVA Branco Neve	0,85
Entorno Construído	Diverso	0,40

Fonte: DORNELLES e RORIZ, 2007; LARANJA (2010)

3.2.2 Definição do PCL

Tendo em vista que os cenários propostos gerarão uma grande obstrução frontal na janela, e conseqüentemente a porção visível de céu será predominantemente a superior, o PCL deverá ser dimensionado para tal situação. Os modelos que melhor se ajustam a ângulos de incidência dos raios mais altos são aqueles com relação D/W maior. Estudos anteriores de Ciampini (2005) e Santos (2009) utilizaram painéis com relação de 0,75 com cortes a 0° e obtiveram bons resultados. Logo, para a análise, foram escolhidos, a partir dos estudos realizados, painéis com relação D/W de 0,75.

São propostas algumas posições sempre tomando como referencial a posição vertical. Logo, serão analisados os ângulos de 0° (vertical), 15°, 30° e 45°. Alguns ângulos foram escolhidos de forma estratégica, como a posição a 30°, que é recomendada por Edmonds (1993) para cenários de cânion urbano e a posição de 45°, encontrada utilizando a formulação proposta

¹² O TropLux utiliza o Método de *backward ray tracing*, em que os raios luminosos são emitidos do ponto de análise para o emissor, por causa disso o plano que absorve os raios fica dentro do elemento envidraçado, para que o efeito desse não seja desprezado.

pelo mesmo autor para cenários desobstruídos. Na Figura 29 são apresentadas as quatro posições do painel.

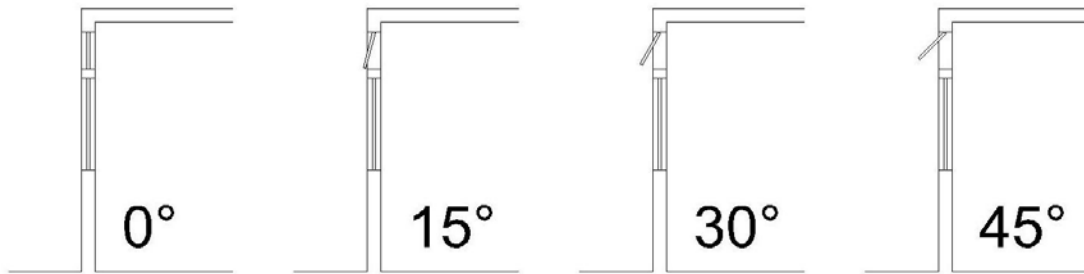


Figura 29 - Exemplo de aplicação do PCL na janela alta

3.2.3 Síntese dos Parâmetros de Modelo Propostos

Diante dos parâmetros propostos, serão estudadas três posições de ambiente que geram fatores de visão de céu conforme apresentados na Figura 30. O cenário 1 corresponde ao ambiente situado no quinto andar, o cenário 2 com o ambiente no terceiro andar, e o cenário 3 com o ambiente no primeiro andar.

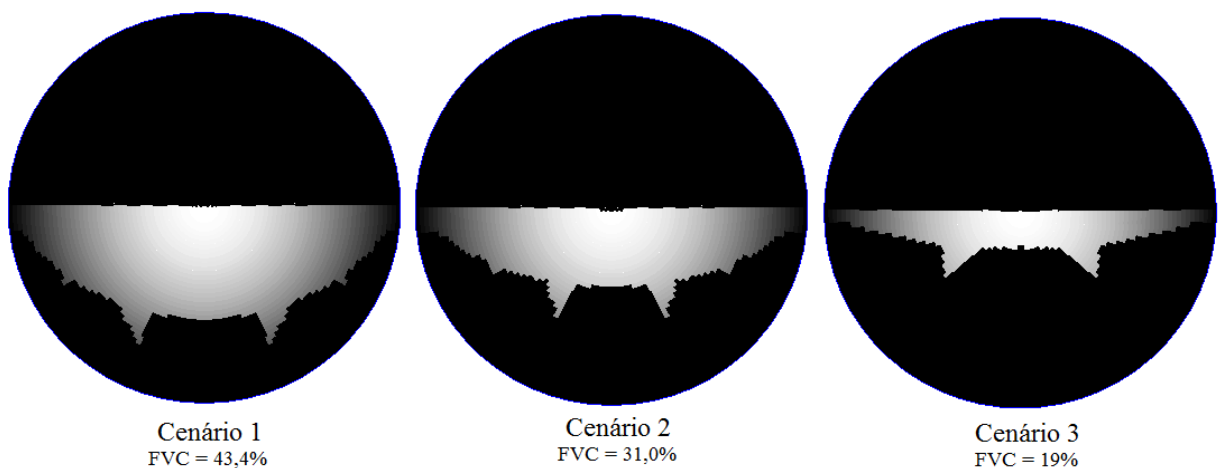


Figura 30 - Fatores de visão de céu para os três cenários estudados

A síntese dos parâmetros propostos está apresentada no Quadro 3. Combinadas os três casos de posições do ambiente, com as cinco variações do elemento, 4 posições do PCL e uma com vidro comum, resultam em um total de 15 modelos gerados no TropLux.

Quadro 3 – Síntese dos parâmetros variáveis nos modelos

Parâmetro	Variações	Descrição
Largura da Via	1	12m
Altura das edificações	1	10 pavimentos (40m)
Afastamentos Frontais	1	7m
Afastamentos Laterais	1	5,5m
Posição do Ambiente	3	1º, 3º e 5º Andar
Relação D/W do PCL	1	0,75
Posição do PCL	4+1	0º, 15º, 30º, 45º + sem PCL

Com a variação do posicionamento dos ambientes, foram obtidos valores de visão de céu que atendem à amplitude desejada das variáveis, apresentado na Figura 30. O fator de visão de céu varia entre 19% e 43%, e amplitude máxima é de 0% a 50%.

3.2.4 Parâmetros de Simulação

Os dados serão calculados em uma malha de pontos definidos a partir da NBR ISO-CIE 8995-1-2013 em seu Anexo B. A formulação proposta pela norma para determina uma distribuição de 9 pontos no sentido do comprimento e 5 pontos na largura, resultando em um total de 45 pontos de cálculo (Figura 31).

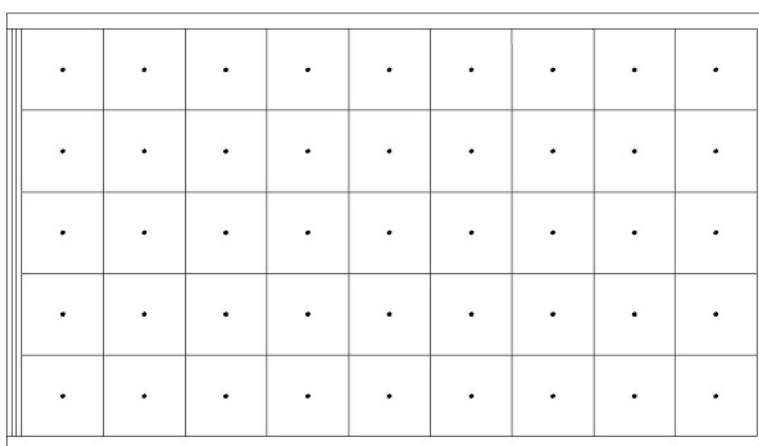


Figura 31 - Disposição dos pontos em malha no ambiente de simulação

Como forma de obter dados anualizados, as simulações ocorrerão nos horários de 7 às 17 horas, todos os dias do ano. Para simulação computacional serão utilizados 4 tipos de céus disponibilizados pelo TropLux, sendo mostrados na Tabela 3. A escolha dos modelos de céu foi feita a partir do estudo de Cabús (2002), que mostrou a predominância desses 3 tipos ao

longo do ano para a cidade de Maceió, local de estudo. O céu com distribuição dinâmica de luminâncias (CDDL) é determinado por uma rotina do TropLux, atualmente apenas para a cidade de estudo, que escolhe um dos 3 tipos (1,10 e 14) de céu, de acordo com a sua probabilidade no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016).

Tabela 3 - Céus utilizados na simulação computacional

Descrição	Número CIE	Número TropLux
Céu nublado, com gradação alta	1	1
Parcialmente nublado, com região próxima ao sol mais brilhante	10	10
Céu com turbidez sem nuvens	14	14
Céu com distribuição dinâmica de luminâncias (Para a cidade de Maceió)	-	16

Serão analisadas duas orientações, com a fachada voltada a leste e a norte. A escolha teve como base o estudo da trajetória solar aparente ao longo da abobada celeste: na orientação leste o sol percorre a abobada na direção normal ao plano da fachada, já na orientação norte a trajetória aparente paralela ao plano da fachada.

A escolha entre leste e oeste é facilitada pelo fato de que as trajetórias são simétricas para as duas orientações, tendo o mesmo período de insolação. A escolha da norte, entre ela e a sul, teve como base o fato dessa apresentar maior tempo de insolação, com um uma diferença de 33% entre elas.

3.2.5 Apresentação e Análise dos Resultados

A análise dos resultados se dividirá em duas partes, a exploratória e a estatística. Na análise exploratória, os resultados serão divididos em 5 blocos relativos a cada uma das posições do PCL nos modelos, como forma de verificar a interferência da variação da visão de céu na aplicação do painel. Os resultados de iluminância média anual global, máximos e mínimos anuais globais, deverão ser verificados para cada orientação e tipo de céu diferente.

Serão comparados os valores de iluminância e também sua uniformidade, como apresentado pela NBR ISO-CIE 8995-1-2013. Segundo o normativo, a uniformidade da

iluminância é a razão entre o valor mínimo e o valor médio da iluminância no plano de trabalho, e seu valor deve ser maior que 0,7 (ou 70%).

A análise estatística dos dados busca verificar os comportamentos encontrados na fase anterior, e serão utilizadas as ferramentas de matrizes de correlação para verificar se há relação entre o fator de céu e as variações propostas. Inicialmente os dados serão agrupados conforme apresentado no apêndice 4 para o desenvolvimento de uma matriz de correlação do conjunto completo.

Posteriormente o conjunto será dividido em grupos, utilizando a técnica de análise de agrupamentos da estatística multivariada. A quantidade de grupos deverá ser definida conforme as características de cada conjunto, privilegiando que no mesmo grupo estejam elementos que já possuem comportamento semelhante conforme verificado na análise exploratória. Por fim cada conjunto de dados será verificado isoladamente novamente com a matriz de correlação, de forma a analisar o comportamento de cada conjunto de casos contido nos grupos.

3.3 Conclusão

As duas fases de desenvolvimento metodológico complementam-se pela necessidade do desenvolvimento de um algoritmo computacional devidamente validado que possa ser utilizado na análise dos modelos urbanos. Apresentada a lógica para a elaboração do algoritmo, os procedimentos para sua validação e as ferramentas para a análise dos modelos urbanos segue-se para a etapa seguinte, de coleta e análise dos resultados.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados e suas análises serão divididos em 3 partes, conforme a divisão proposta nos objetivos do trabalho. Inicialmente, será abordado o desenvolvimento do algoritmo necessário aos processamentos da simulação computacional e sua validação; posteriormente será feita uma análise exploratória dos resultados obtidos através dos modelos estudados e, por fim, a análise estatística do conjunto de dados obtidos.

4.1 Algoritmo Computacional

Tomando como base o algoritmo utilizado pelo TropLux, foram desenvolvidas rotinas auxiliares de forma a permitir que o *software* pudesse trabalhar com a transmissão luminosa entre meios com densidades diferentes. A metodologia do algoritmo do TropLux – incluindo a forma como os métodos do raio traçado, Monte Carlo e os coeficientes de luz natural são utilizados – está descrita na tese de Cabús (2002), e foi fundamental para o desenvolvimento do algoritmo.

Algumas funções dentro do software tiveram que sofrer algum tipo de alteração para comportar as novas informações necessárias ao processamento. Originalmente, o TropLux permite que o usuário defina os planos que geram o modelo computacional e posteriormente configure-os de forma a indicar sua refletância e transmitância, difusa e especular. Foram alterados alguns padrões nessa entrada de dados de forma a comportar novas informações.

4.1.1 Desenvolvimento - Entrada de Dados

Inicialmente, foi necessária a criação de uma nova forma de definir as características físicas do plano no TropLux. Até então, havia três opções de planos, descritas na Tabela 4, referentes a um plano comum, um plano imaginário e um plano com características de um vidro comum, com transmitância e refletância direcionais definidas pelas formulações de Tregenza (1993). Apenas no plano comum é possível alterar as características físicas, entretanto, nenhuma delas faz referência ao índice de refração do material. Para tanto, foi proposta uma

nova metodologia, mantendo os tipos antigos e permitindo que fossem acrescentados pelo usuário quantos tipos fossem necessários aos planos de interface entre meios com índices de refração diferentes, de forma a permitir a descrição física de diversos meios e suas interfaces.

Tabela 4 - Descrição dos Tipos de planos originais permitidos pelo TropLux e a nova tipologia utilizada

Tipo Original	Descrição	Tipo Novo	Descrição
-1	Plano Comum, com refletância e Transmitância definidas pelo usuário	< 0	Plano Comum, com refletância e Transmitância definidas pelo usuário
0	Plano imaginário, que contém os pontos de análise	0	Plano imaginário, que contém os pontos de análise
1	Plano com características de vidro, fixas e definidas pelo programa conforme o ângulo de incidência (TREGENZA, 1993)	1	Plano com características de vidro, fixas e definidas pelo programa conforme o ângulo de incidência (TREGENZA, 1993)
		>1	Planos de interface entre meios com índices de refração diferentes

Ao trabalhar com meios diferentes, associa-se à ideia de volume, entretanto, como o interesse, quando tratada a luz, é apenas a superfície de interface entre eles, o meio será tratado pelos planos que compõem seu domínio. Computacionalmente, no TropLux, o plano é definido por quatro pontos, em que a face para onde ele está voltado é definida pela ordem em que os pontos são descritos. Estando os pontos no sentido anti-horário do observador, o plano está voltado para ele, quando está no sentido horário o plano está voltado para o outro lado. Essa característica faz com que sejam necessárias duas faces, uma voltada para cada lado, para definir corretamente um plano real.

Desse modo, cada plano composto de duas faces corresponderá à interface entre dois meios. Na Figura 32, é possível observar a forma como o raio de luz se comporta utilizando essa nova configuração de definições. O raio luminoso, proveniente do meio N2 atinge o elemento prismático em um de seus planos composto de duas faces, uma voltada para dentro, em azul, e outra para fora, em vermelho. No ponto de impacto, o raio identifica o plano atingido, bem como a face correspondente e computa uma mudança de índice de refração, de N2 para N1, alterando sua direção. Dentro do prisma, o raio atinge o plano oposto, em uma face que indica uma nova mudança, agora de um índice de refração N1 para N2. A partir desse percurso,

é possível definir dois tipos de faces, em que a ordem dos índices de refração é diferente, e que serão utilizadas no novo algoritmo.

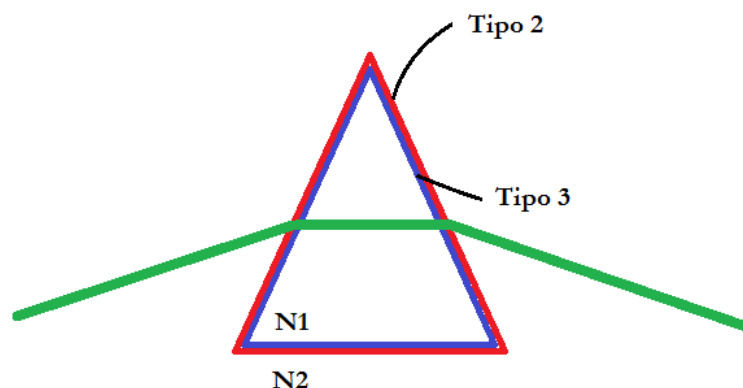


Figura 32 - Esquemática do comportamento do raio de luz ao interagir com um elemento prismático

A definição dos meios, nesse sentido, se dá pela definição das faces voltadas para dentro e para fora deles, bem como os índices de refração relativos à cada material. Essa sistemática permite que sejam adicionados inúmeros tipos de materiais diferentes em um mesmo modelo.

4.1.2 Desenvolvimento - Processamento de Dados

O processamento da iluminância no TropLux é realizado em três etapas distintas: o cálculo dos coeficientes diretos, o cálculo dos coeficientes difusos e o cálculo da iluminância. O algoritmo foi inserido nas duas primeiras etapas de processamento, onde o programa calcula os coeficientes de luz natural, direto e difuso, para o ponto de simulação solicitado pelo usuário.

No processamento dos coeficientes diretos, o TropLux lança raios do ponto de análise diretamente para o centro dos setores de céu utilizados. Cabús (2002) utiliza como base a divisão de céu de 145 setores da CIE, entretanto, tendo em vista que a área que o sol ocupa no céu é bastante inferior à área de um setor original, é utilizada no TropLux uma divisão mais refinada, de 5221 partes, como apresentado na Figura 33.

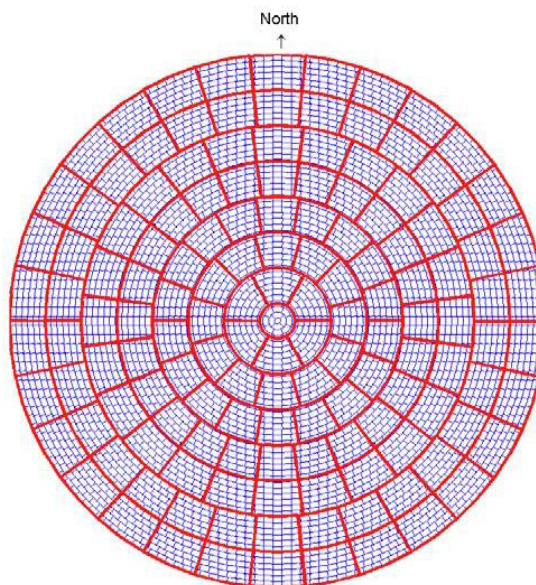


Figura 33 - Divisão do céu em 145 partes sobre a divisão de 5221
Fonte: CABÚS, 2002

O processo de cálculo dos coeficientes de luz natural diretos é apresentado na Figura 34. Os elementos em azul representam a sequência original e os laranjas os acréscimos realizados para que fosse possível computar os elementos prismáticos.

A principal alteração é que o raio ao ser emitido pode atingir uma superfície onde há mudança de meio, havendo assim a refração. No vidro comum também acontece esse efeito, entretanto, não há alteração significativa na direção do raio incidente tendo em vista que a formulação utilizada pelo TropLux simplifica tais situações. Nos elementos prismáticos, o efeito de refração deverá ser computado, bem como a mudança de direção e de peso do raio em função do ângulo de incidência e do índice de refração dos meios.

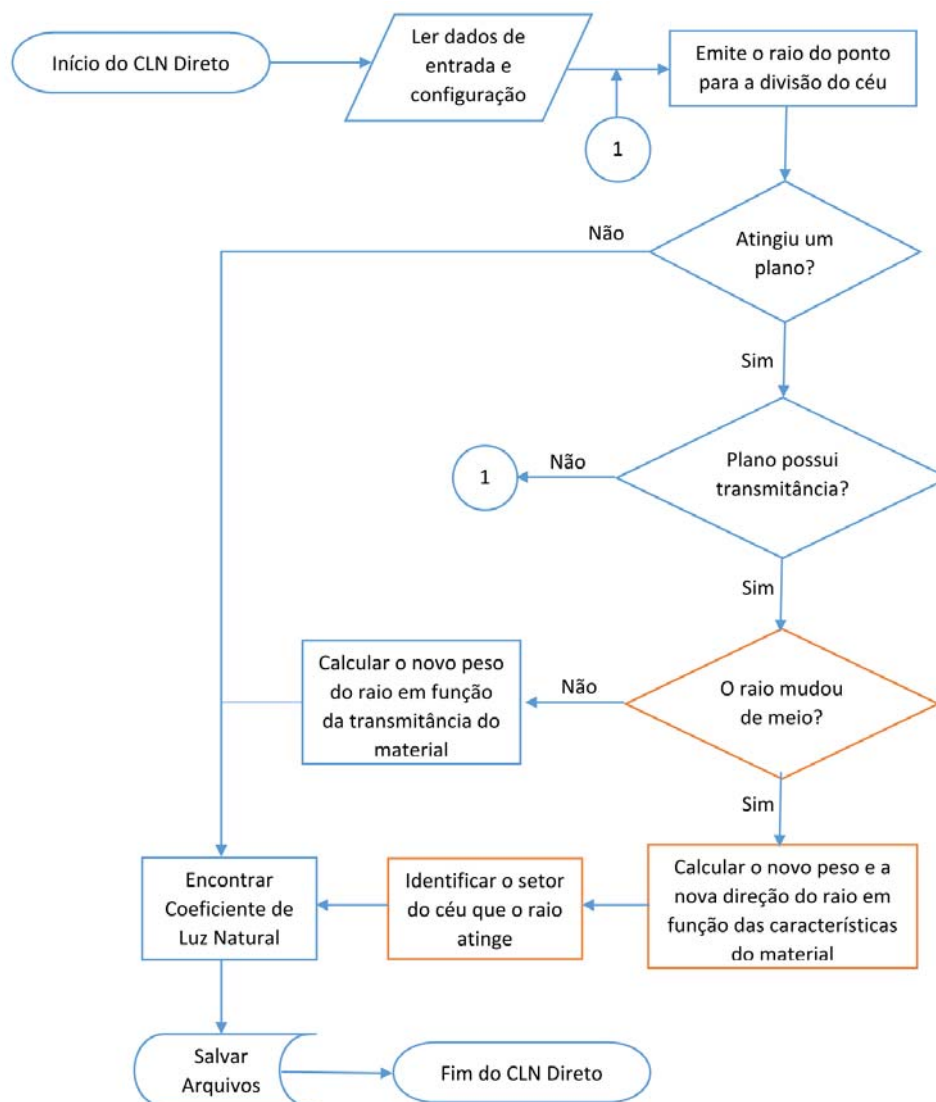


Figura 34 - Fluxograma para processamento dos coeficientes diretos de luz natural
 Fonte: Adaptado de CABÚS (2002)

Três novas funções foram criadas para lidar com a refração entre meios cujos algoritmos constam nos apêndices. No cálculo dos coeficientes diretos duas são utilizadas, a 'fPrismTr.m' e a 'fPrismTrRef.m'. A primeira calcula a direção do raio transmitido depois de incidir na superfície, utilizando como referencial os cossenos diretores do raio original e o ponto de interseção dele com o plano. A segunda calcula a refletância e a transmitância da superfície em que o raio luminoso atinge, estando o valor diretamente relacionado com o ângulo que esse raio possui com o plano. A depender do ângulo de refração do raio, ele pode, em uma interação com outro plano, sofrer o fenômeno da reflexão total interna. Entretanto, ao sofrer esse efeito, deixa de ser computado como um raio direto, e não entra nos coeficientes de luz natural direta, apenas nos difusos.

O raio luminoso que sofre o efeito da mudança de direção após atravessar um elemento prismático não atingirá mais o mesmo setor de céu para o qual foi inicialmente direcionado. Para tal situação faz-se necessária a utilização de uma função já presente no TropLux, que identifica o novo setor ao qual o raio atinge.

Para o cálculo dos coeficientes difusos, além das funções citadas, é utilizada a 'fPrismRef.m' que calcula a direção do raio refletido. Para essa situação, a função fPrismTrRef.m' incorpora o método Monte Carlo para definir se o raio será transmitido ou refletido após atingir o plano de interface entre meios de diferentes densidades.

4.1.3 Comportamento – Coeficientes Diretos

Para verificar o comportamento da função dos coeficientes diretos, foram realizados alguns testes conforme estabelecidos na metodologia. Na Figura 35 é apresentado o diagrama de visão de céu dos coeficientes de luz natural diretos para três pontos dentro do ambiente com e sem o PCL. Apresenta-se apenas a metade da projeção da hemisfera, já que a outra parte não é visível através da janela. Observa-se que a adição do PCL altera significativamente a componente direta, reduzindo a incidência de luz solar direta nos pontos analisados. Esse comportamento atesta o fato do PCL servir, em algumas situações, como protetor solar, além de sua função redirecionadora.

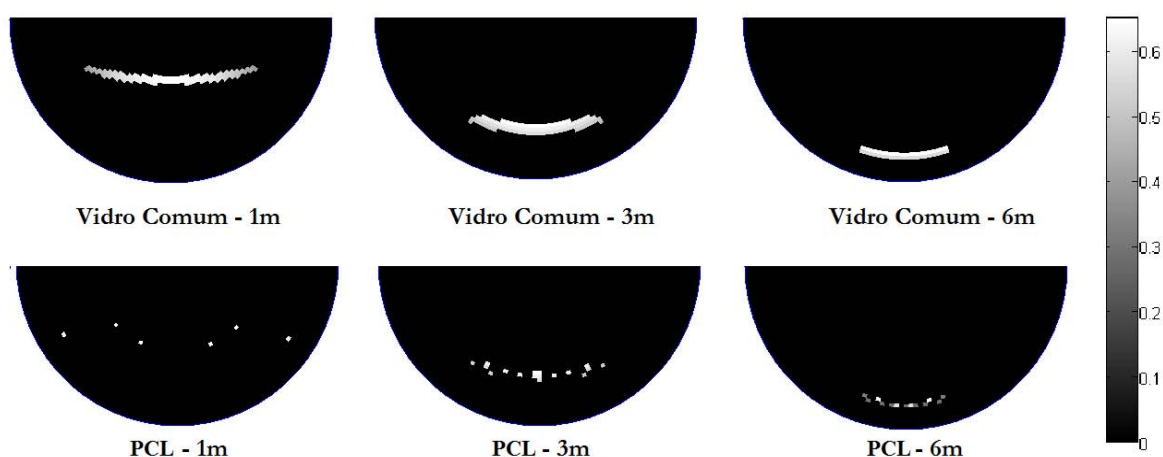


Figura 35 - Diagrama de contribuição de céu direto para os pontos distantes 1, 3 e 5 metros de distância da abertura, para o modelo proposto

Ainda é possível observar que as regiões do céu que contribuem diretamente para os pontos de análise tendem a ter uma forma mais dispersa no diagrama. Se comparada ao modelo com vidro comum, essa dispersão vai se reduzindo ao passo em que o ponto se distancia da janela. Tal comportamento revela que o PCL consegue reduzir a incidência de sol direta nos pontos próximos à janela, mas a mantém nos pontos mais distantes.

4.1.4 Comportamento – Coeficientes Difusos

Para o cálculo dos coeficientes difusos, aplica-se o método Monte Carlo para garantir que sejam emitidos um número de raios, e em diversas direções, suficiente para representar corretamente o comportamento da luz natural com uma margem de erro definida pelo usuário, para o TropLux Cabús (2002) recomenda a utilização de 5%. O processo de cálculo dos coeficientes de luz natural diretos é apresentado na Figura 36. Os elementos em azul representam a sequência original e os laranjas os acréscimos realizados para que fosse possível computar os materiais prismáticos.

Para os coeficientes difusos, mais uma função se faz necessária: a que calcula a direção do raio refletido, “fPrismRef”. Essa função já é utilizada no programa, e deriva de teorias básicas da geometria analítica. Entretanto, como no TropLux ela encontra-se embutida em outros códigos, houve a necessidade de separá-la das demais.

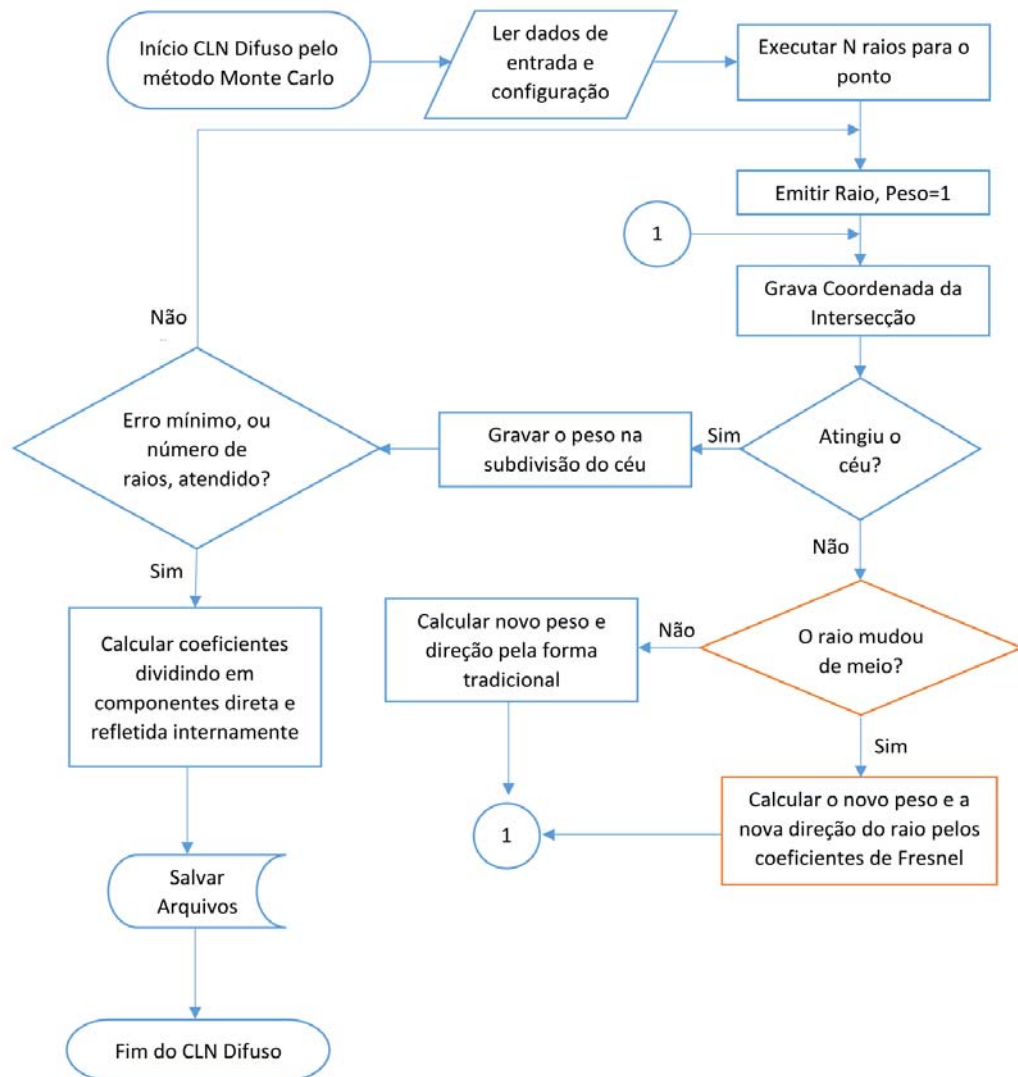


Figura 36 - Fluxograma para processamento dos coeficientes difusos de luz natural
 Fonte: Adaptado de CABÚS (2002)

O funcionamento do processamento difuso, quanto às novas funções, difere do processamento direto pelo fato dos raios luminosos serem emitidos segundo uma distribuição normal, em direções ordenadas segundo o método Monte Carlo. Para a verificação do comportamento da componente difusa, foi realizado o mesmo teste utilizado na componente direta, entretanto essa apresenta um diagrama de 145 partes. O comportamento da componente para os modelos com vidro comum e com PCL são apresentados na Figura 37, para a metade da hemisfera, já que a outra parte não é visível através da janela.

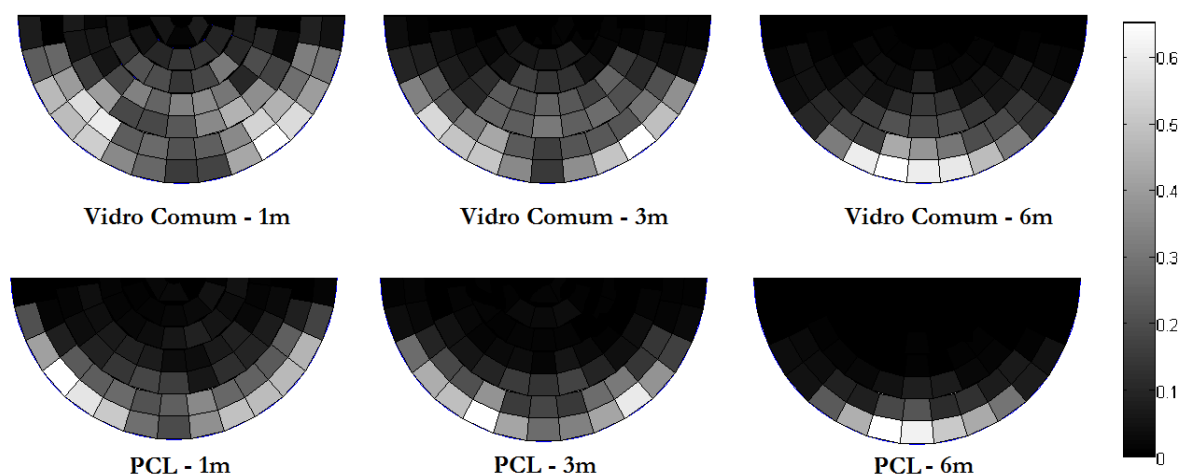


Figura 37 - Diagrama de contribuição de céu difuso para os pontos distantes 1, 3 e 5 metros de distância da abertura, para o modelo proposto

A partir dos diagramas, é possível observar uma alteração nos setores de céu que contribuem para a componente difusa dos pontos analisados. Há uma tendência de redução da contribuição das partes mais altas do céu e um aumento da contribuição do horizonte. Esses resultados apontam que a posição vertical do painel reduz significativamente os pontos de contribuição céu, reduzindo a captação de luz natural. Outras posições devem ser estudadas a fim de verificar seu melhor funcionamento.

4.1.5 Validação – Vidro Comum

Para verificação dos resultados encontrados com o algoritmo desenvolvido foram comparados inicialmente, conforme apresentado na metodologia, os valores de transmitância e refletância para o vidro comum. Utilizou-se como referência o artigo de Edmonds (2000), que apresenta uma formulação matemática para a utilização em elementos prismáticos, e a formulação proposta por Tregenza (1993), utilizada pelo TropLux. Na Figura 38 são apresentados os diagramas de transmitância e refletância direcional em um vidro comum de 8mm de espessura.

Observa-se que o modelo desenvolvido apresenta comportamento semelhante aos demais referenciais comparados. O diagrama mostra uma alta transmitância quando o raio incide ortogonalmente à superfície, que vai diminuindo gradualmente ao passo que a refletância aumenta quando o ângulo de incidência do raio luminoso vai aumentando.

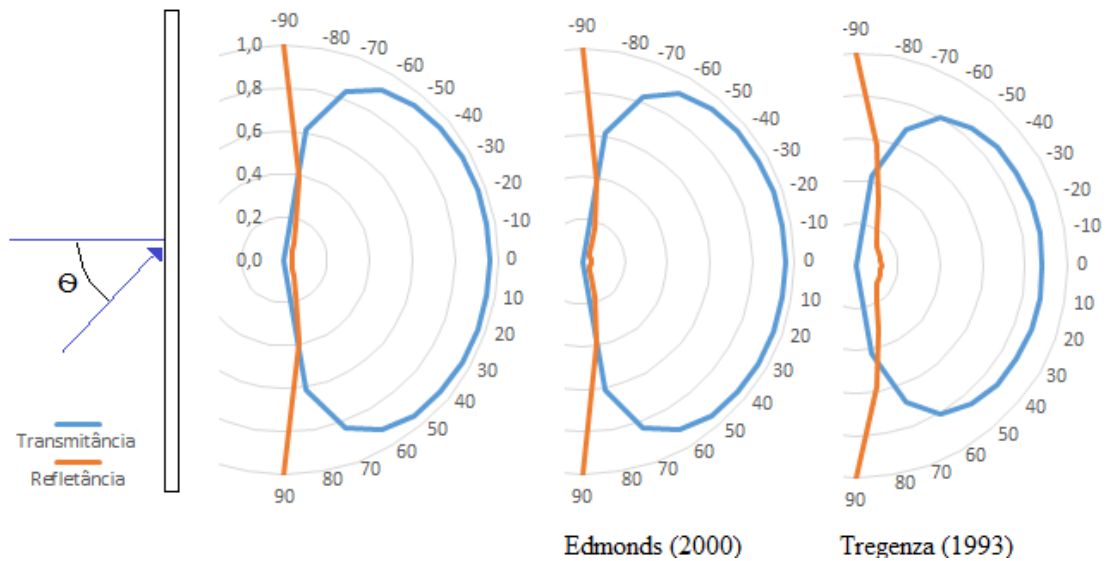


Figura 38 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro comum analisado a partir do algoritmo desenvolvido pelo autor, da formulação de Edmonds (2000) e de Tregenza (1993)

A análise quantitativa dos resultados é apresentada na Figura 39. Ao comparar os valores obtidos pela formulação de Edmonds (1993) e os obtidos pelo algoritmo desenvolvido, observa-se que os resultados são iguais, apresentando um coeficiente de correlação de 1,000. Já na formulação de Tregenza (1993), observa-se um índice de correlação ainda muito alto, de 0,933. Os dois resultados atestam que o algoritmo desenvolvido conseguiu simular as características do vidro plano. As diferenças existentes, principalmente quando comparado ao modelo de Tregenza (1993), deve-se ao fato de que o autor realiza uma simplificação do modelo matemático utilizado, fazendo com que alguns efeitos importantes, como o da interreflexão, não sejam propriamente computados.

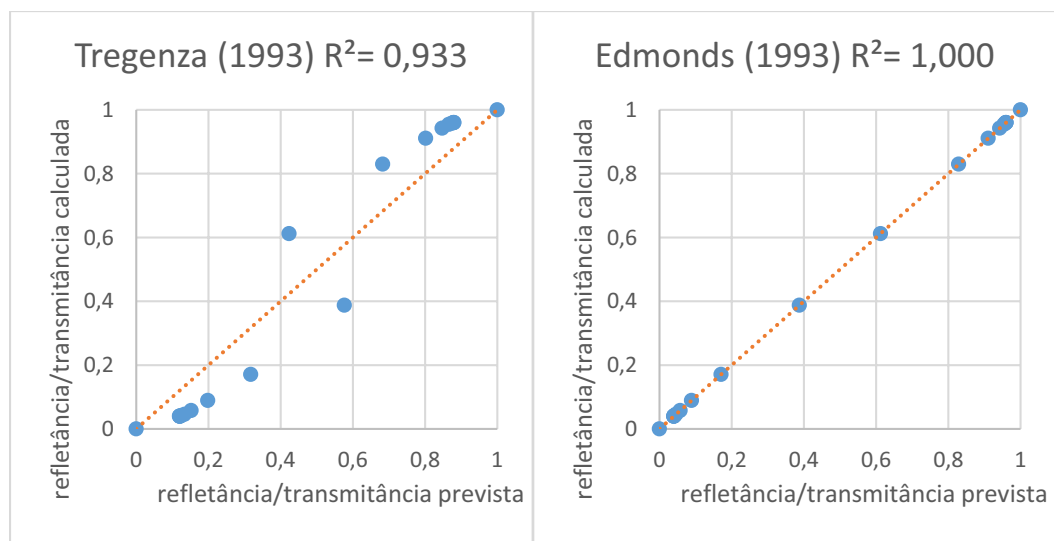


Figura 39 - Nuvem de dados de refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro comum

4.1.6 Validação – Vidro Prismático

Para a verificação do comportamento no elemento prismático, foram feitas duas análises para cada face do elemento, tendo em vista que apenas em uma de suas faces há o padrão de gravação com prismas. O elemento inicialmente analisado foi o vidro prismático padrão 45/45 (SITECO, 2012), que possui os prismas com o mesmo ângulo de inclinação em suas faces. O diagrama com os resultados encontrados é apresentado na Figura 40.

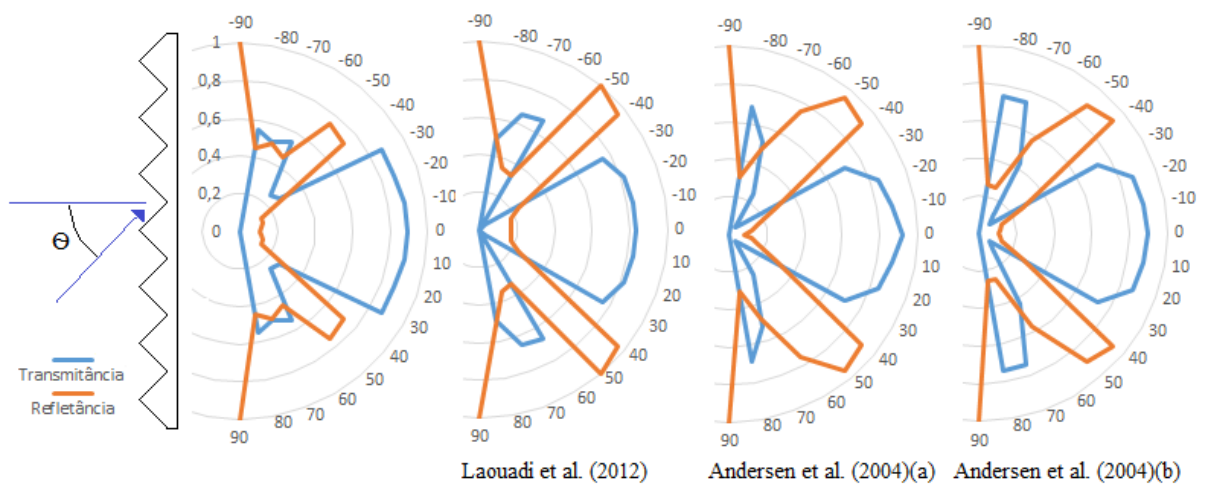


Figura 40 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro prismático, com incidência na face prismática, analisado a partir do algoritmo desenvolvido, da formulação de Laouadi et al. (2012) e Andersen et al. (2004)

Primeiro, observa-se a divergência entre os resultados dos modelos encontrados na literatura. O comportamento global é semelhante, entretanto, a análise dos valores mostra divergências principalmente na faixa entre 20° e 70° . Laouadi et al. (2012) atribuem essa diferença a variações no material decorrentes da manufatura dos elementos, em que as pequenas imperfeições superficiais são a causa de tais discrepâncias. Comparando qualitativamente os gráficos, observa-se que o algoritmo proposto consegue reproduzir o comportamento do elemento. Importante notar que há uma faixa, entre 30 e 50 graus de incidência, em que ocorre uma drástica redução da transmitância e um repentino aumento da refletância.

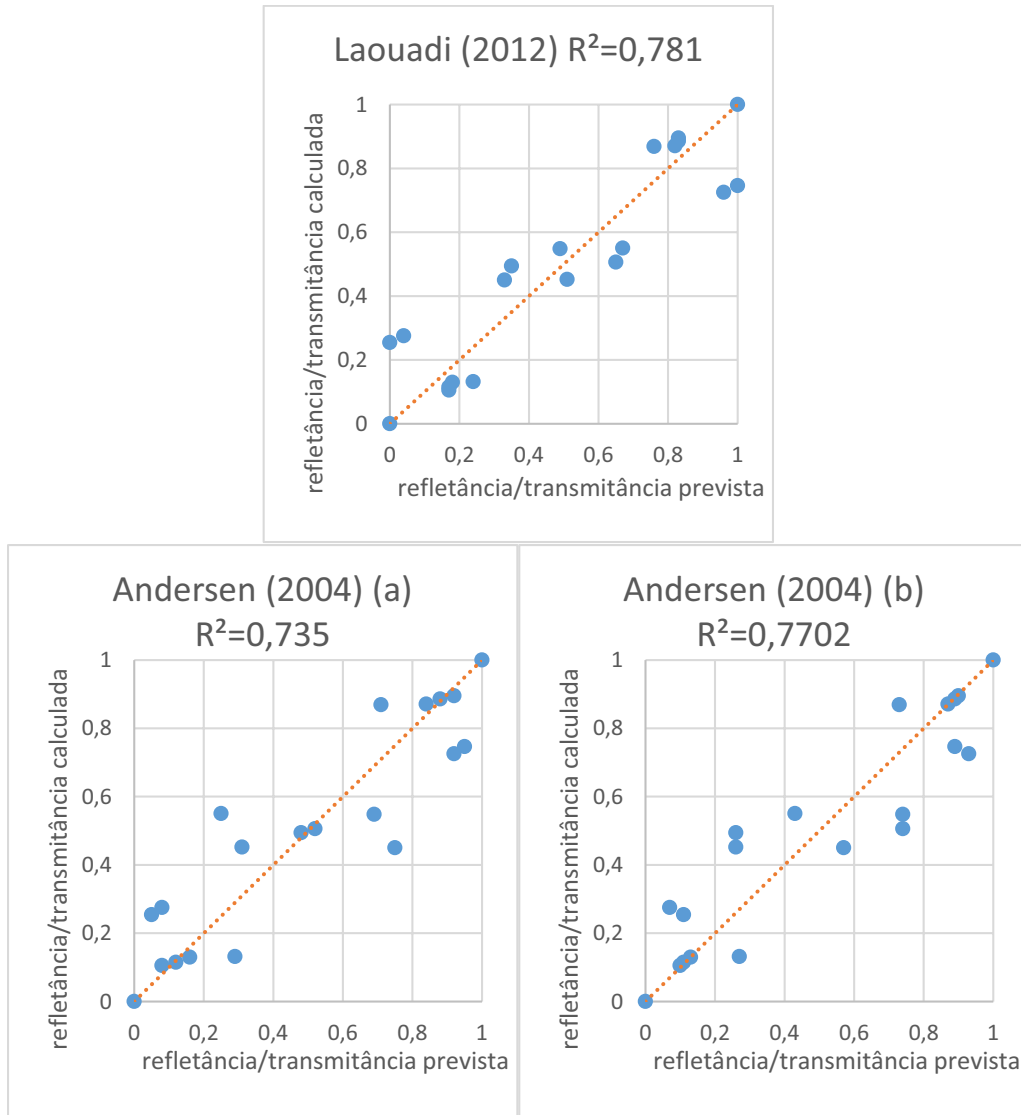


Figura 41 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro prismático com raios incidindo sobre a face prismática.

A análise quantitativa dos resultados é apresentada na Figura 41. É possível perceber que os resultados que mais se aproximaram do modelo proposto foram o de Laouadi et al. (2012), que também utiliza simulação computacional para obtenção dos dados. A diferença entre esses dois modelos pode ser justificada pelo fato de que, mesmo que ambos utilizem a mesma metodologia do raio traçado, as abordagens utilizadas são diferentes. O algoritmo desenvolvido utiliza os coeficientes de Fresnel combinado com o método Monte Carlo para definir o caminho do raio luminoso. Entretanto, Laouadi et al. (2012) utiliza formulações semelhantes às de Edmonds (1993), em que o raio é definido pelas probabilidades de diferentes eventos acontecerem, sem importar propriamente a geometria do modelo.

Os resultados apontam ainda valores de R^2 menores que os encontrados para o vidro comum, o que mostra que com o aumento no grau de complexidade do elemento a tendência é

que os modelos passem a apresentar diferenças entre si. Em geral, os valores indicam que o algoritmo desenvolvido consegue simular as características do vidro prismático.

Para a análise com os raios incidindo na face lisa do elemento os resultados são apresentados na Figura 42. É possível perceber que todos os modelos apresentados possuem comportamento semelhante, com baixa transmitância para raios incidindo normal ao plano do elemento, que aumenta rapidamente até voltar a zero na posição paralela à face do elemento.

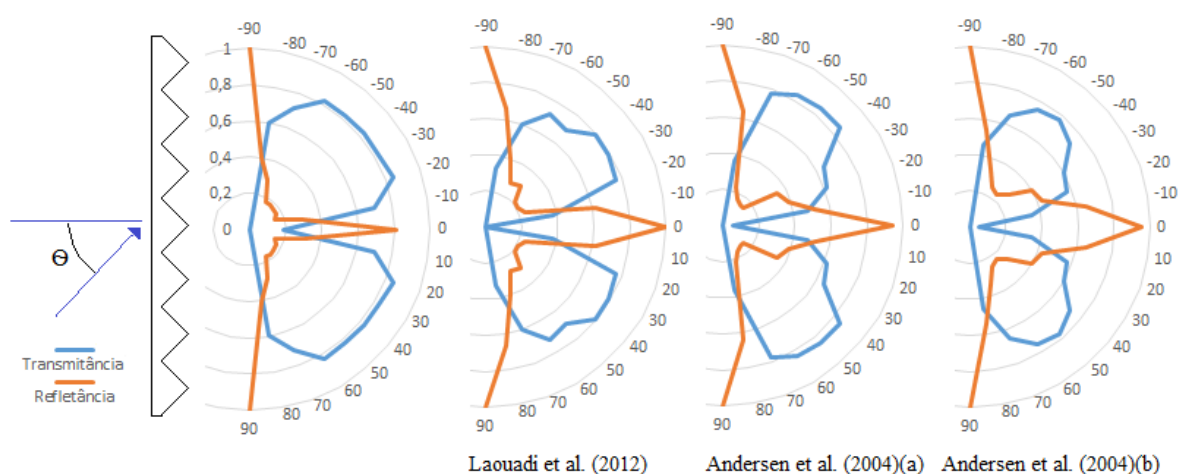


Figura 42 - Transmitância e Refletância direcional para o vidro prismático, com incidência na face lisa, analisado a partir do algoritmo desenvolvido, da formulação de Laouadi et al. (2012) e Andersen et al. (2004)

Observa-se, ainda, que os modelos já apresentados na literatura possuem diferenças entre si, resultado do efeito apresentado anteriormente. A comparação entre os dados medidos e calculados é apresentada na Figura 43. Nessa distribuição, foi obtido um R^2 máximo de 0,749 para os dados apresentados por Andersen et al. (2004). Para o mesmo elemento, apenas com a mudança no lado em que o raio luminoso incide, houve uma diferença no referencial da literatura que alcançou o maior valor de R^2 , o que atesta que mesmo os referenciais adotados possuem diferenças entre si, mas que não invalidam as análises.

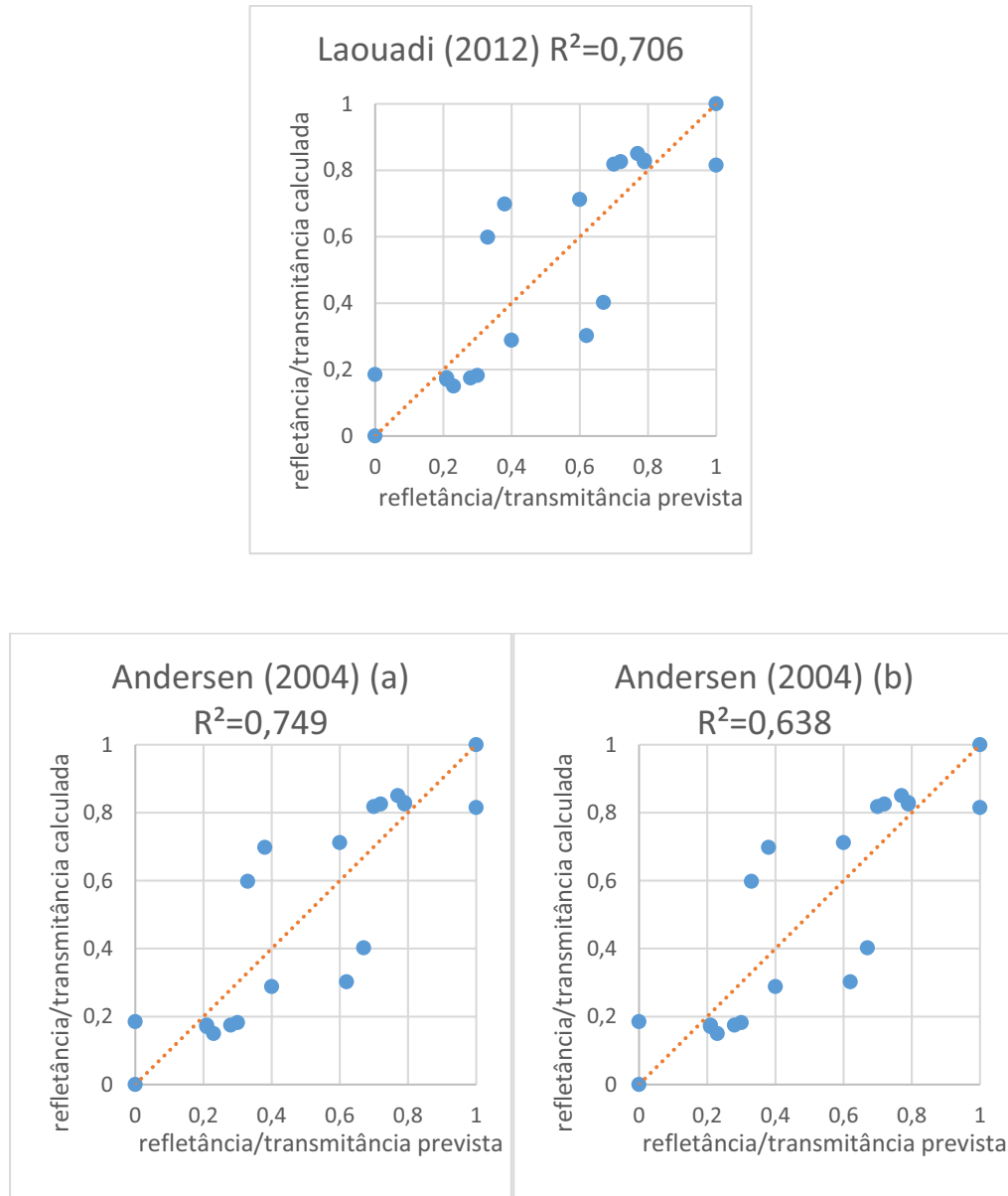


Figura 43 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o vidro prismático com raios incidindo sobre a face lisa

4.1.7 Validação – Painel de Corte a Laser

Por fim, foi realizado o procedimento de comparação em um painel de corte a laser utilizando os referenciais teóricos apresentados na metodologia. Foi utilizado um tipo de painel de corte a laser com uma relação D/W de 0,3. Os diagramas com os resultados são apresentados na Figura 44.

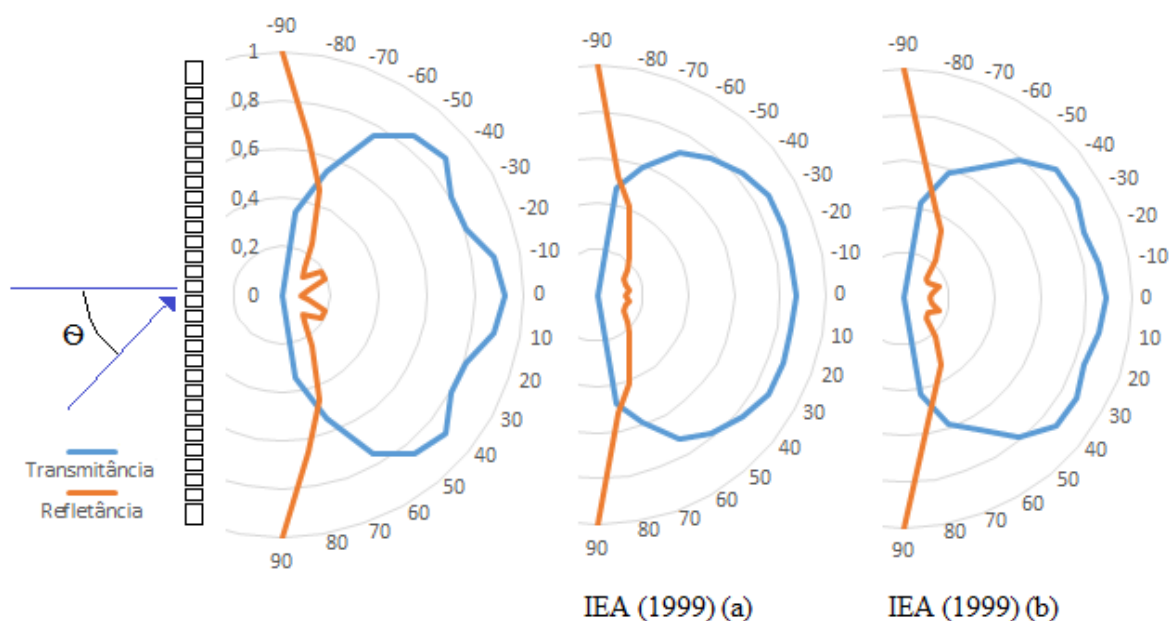


Figura 44 - Transmitância e Refletância direcional para o PCL analisado a partir do algoritmo desenvolvido e dos dados da IEA (1999)

Observa-se a partir dos diagramas que o comportamento do algoritmo desenvolvido se aproxima do medido pela IEA (1999). É importante notar, também, que há alta transmitância perpendicular ao material, o que indica que ele não deve obstruir a visão externa, quando aplicado à janela. Quando forem analisadas as porções defletidas e transmitidas pelo elemento, será possível perceber a direção em que esses raios transmitidos deixarão o painel logo após atravessá-lo.

Na Figura 45, é possível observar a relação entre os dados medidos e os esperados para todo o conjunto de relações D/W. Para o referencial utilizado os valores de R^2 foram maiores que 0,960. Os resultados apontam que o algoritmo desenvolvido consegue reproduzir comportamento luminoso semelhante ao elemento real. As diferenças entre os resultados do algoritmo e o medido em laboratório pela IEA (1999) são explicadas por Edmonds (2000), apontando que tais diferenças são fruto das alterações na superfície de corte gerada pela máquina de corte a laser. Tal superfície não é perfeitamente plana, como no modelo computacional, mas possui pequenas ondulações. Esse efeito poderia ter sido inserido no modelo com a adoção de uma pequena parcela de reflexão difusa nos planos, entretanto, escolheu-se por não contabilizar tendo em vista que seriam necessários novos testes a fim de determinar o percentual de reflexão difusa necessário para tal.

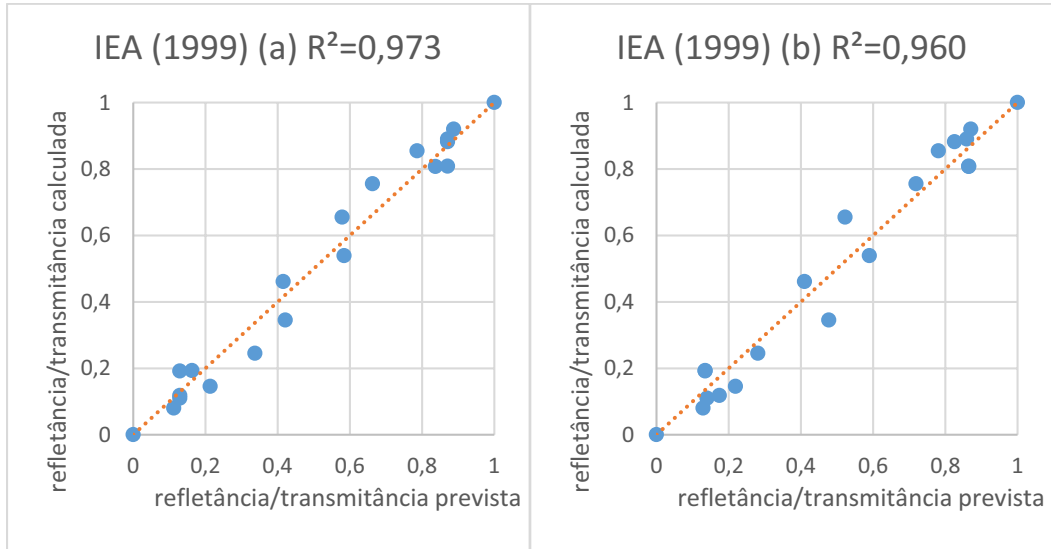


Figura 45 - Correlação entre refletância/transmitância prevista e calculada para o PCL

A última análise diz respeito à deflexão dos raios luminosos no PCL. Na Figura 46, esse efeito pode ser observado de duas formas: no modelo real (esquerda) e pelo método do raio traçado, utilizando o algoritmo desenvolvido (direita). Para as duas figuras, a luz incidente vem da parte superior direita, a um ângulo com a normal de 50° . Observa-se que uma parte dos raios que atravessam o material muda de direção, outra parte continua na mesma direção e o restante é refletido para o interior. Em uma análise visual dos dois comportamentos, já se observa uma semelhança entre o elemento real e o modelo computacional.

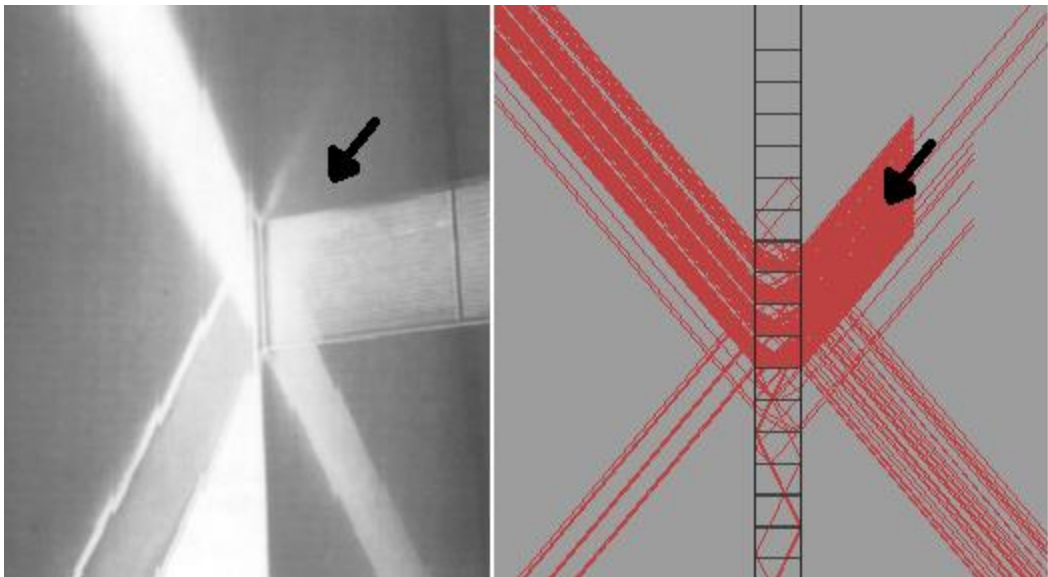


Figura 46 - Exemplo de deflexão da luz incidente pelo lado direito do painel para o elemento real (EDMONDS, 1993) e para o algoritmo proposto, com o mesmo ângulo de incidência.

Na Figura 47, é possível observar o conjunto de dados obtido por Edmonds (1993) e os obtidos utilizando o raio traçado associado ao algoritmo desenvolvido nesta dissertação. Os resultados apontam um comportamento do modelo computacional semelhante ao real, apresentando uma diferença percentual máxima de 8%. Apenas no modelo com D/W de 0,7, para os ângulos de 70 e 80 graus foram encontradas diferenças significativas, entretanto o próprio Edmonds (ib.) aponta que os resultados obtidos nos modelos reais por ele utilizados, por terem sido obtidos com ferramentas simplificadas, possuem divergências – principalmente nos ângulos próximos a 90°.

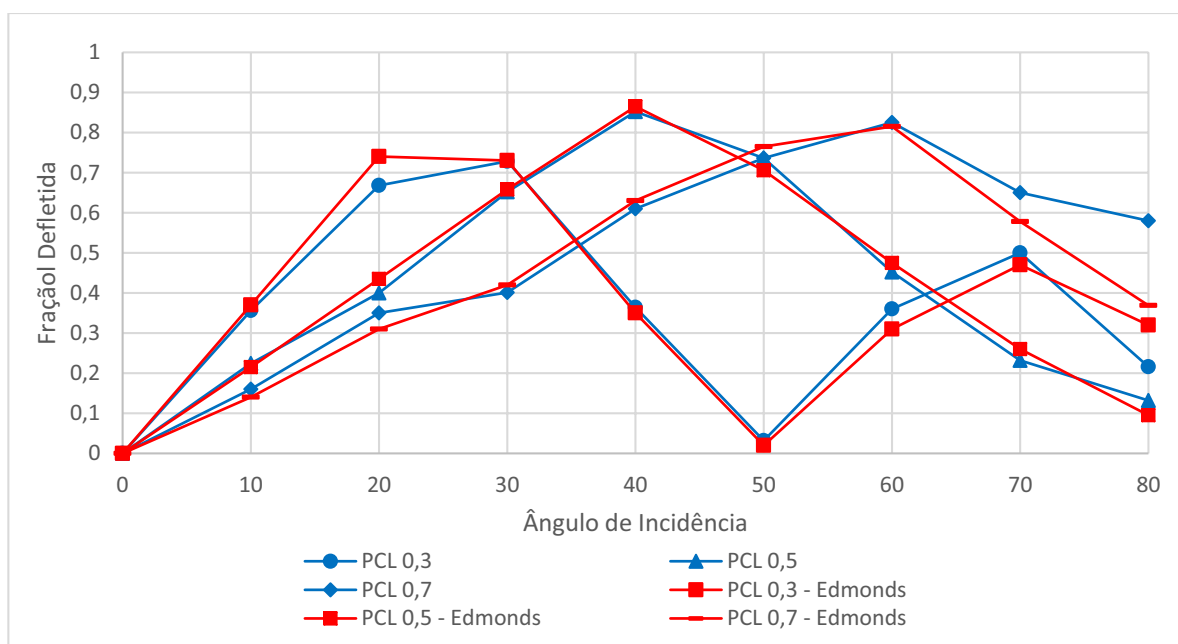


Figura 47 - Deflexão dos raios luminosos para os três tipos de PCL, com os resultados obtidos pelo raio traçado, utilizando o algoritmo desenvolvido, e o obtido de Edmonds (1993)

4.1.8 Conclusão da Validação

As análises desenvolvidas para validação do algoritmo proposto neste trabalho mostraram que a formulação e a metodologia utilizadas conseguiram obter o comportamento esperado. Os referenciais teóricos utilizados para a validação já possuíam diferenças entre si, o que reforça a necessidade de utilizar mais de um conjunto de dados como referência e de compará-los.

A avaliação qualitativa por meio dos diagramas de transmitância e refletância mostraram comportamentos semelhantes aos referenciais utilizados, sendo os melhores resultados encontrados para o painel de corte a laser. A análise quantitativa por meio de relações entre o

medido no algoritmo desenvolvido e o dado da literatura mostrou que os melhores valores de R^2 encontrados foram para o painel de corte a laser, e que nos demais tipos de elementos esse valor não foi inferior a 0,76.

Essa fase de verificação aponta que o algoritmo consegue representar os efeitos luminosos em elementos com mudança no índice de refração do material, permitindo que ele seja utilizado nas próximas etapas do trabalho.

4.2 Avaliação Quantitativa dos Modelos

A análise exploratória dos dados será feita em seis partes: nas cinco primeiras serão verificados os comportamentos para cada posição do painel de corte a laser e por último uma síntese dos resultados obtidos e uma avaliação global.

4.2.1 Modelo sem PCL

O comportamento dos resultados de iluminância anual global é apresentado na Figura 48. A partir do gráfico, observa-se uma tendência de redução dos valores médios, máximos e mínimos com a redução do fator de visão de céu. O cenário 3, que possui menor fator de visão de céu, atingiu os menores níveis de iluminância. O céu com distribuição dinâmica de luminância (16) foi o que apresentou reduções mais expressivas, de até 22% de redução da média global. Os valores máximos ultrapassaram os 900 lx, para os céus parcialmente encoberto (10) e claro (14).

Os picos de iluminância encontrados nos modelos evidenciam que a geometria sem nenhuma proteção solar permitiu que a luz direta entrasse pela abertura, gerando concentração de luz próxima à janela. O céu parcialmente encoberto (10) foi o que atingiu os maiores índices de redução da iluminância.

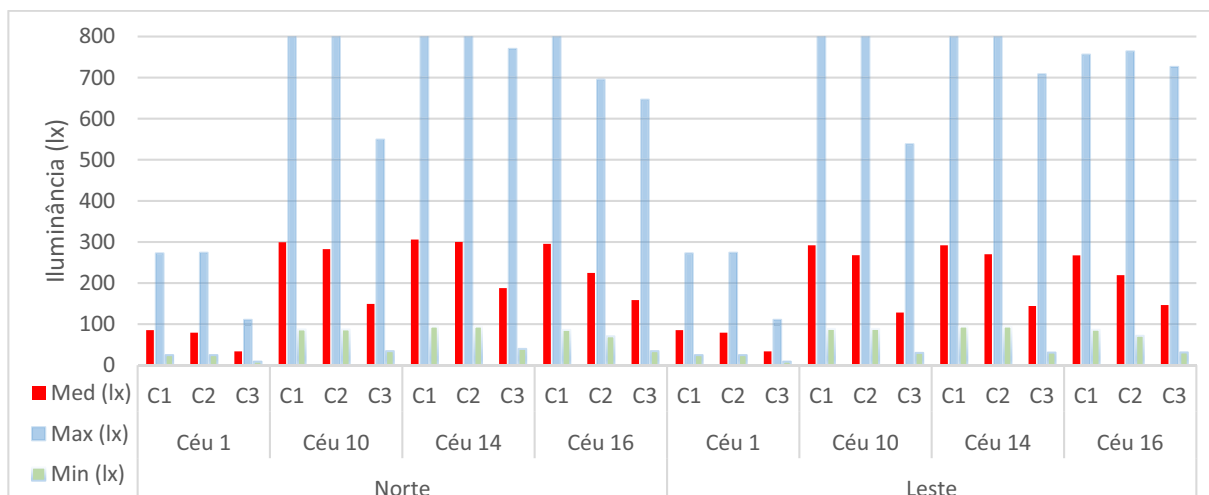


Figura 48 - Gráfico de Iluminância Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos sem o PCL

Nas duas orientações, a redução da iluminância é evidente, entretanto, no céu encoberto ela chega a no máximo 7% (entre os cenários 1 e 2) e 57% (entre os cenários 2 e 3). É importante observar que do cenário 1 para o 2 as reduções percentuais da iluminância média são menores que do cenário 2 para o 3, indicando que com a diminuição do fator de visão de céu há uma diminuição na taxa de redução da iluminância média.

Os resultados para uniformidade da iluminância são apresentados na Figura 49 e percebe-se dois comportamentos distintos neste caso. Inicialmente, há uma redução menos expressiva em uniformidade do cenário 1 para o 2, de no máximo 9% para a orientação Leste no céu parcialmente encoberto (10). Entre esses dois cenários há uma redução de visão de céu de 27%, resultando em um máximo de 9% de redução de uniformidade.

Entre os cenários 2 e 3, observa-se o mesmo efeito, entretanto mais evidente, de até 31,5% para o mesmo caso anterior, quando há uma redução de visão de céu de 38,7%. Mais uma vez, os resultados evidenciam que a relação entre visão de céu e níveis de iluminância não é linear, mas aumenta conforme a visão de céu diminui.

Nesta análise, o céu encoberto foi o que apresentou as menores reduções, enquanto que os demais apresentaram resultados superiores. Esse comportamento pode ser explicado pela grande contribuição da componente refletida para a iluminância dos ambientes. Com a redução do FVC, reduz-se a luz direta, e conseqüentemente a componente refletida passa a ter maior relevância nos resultados.

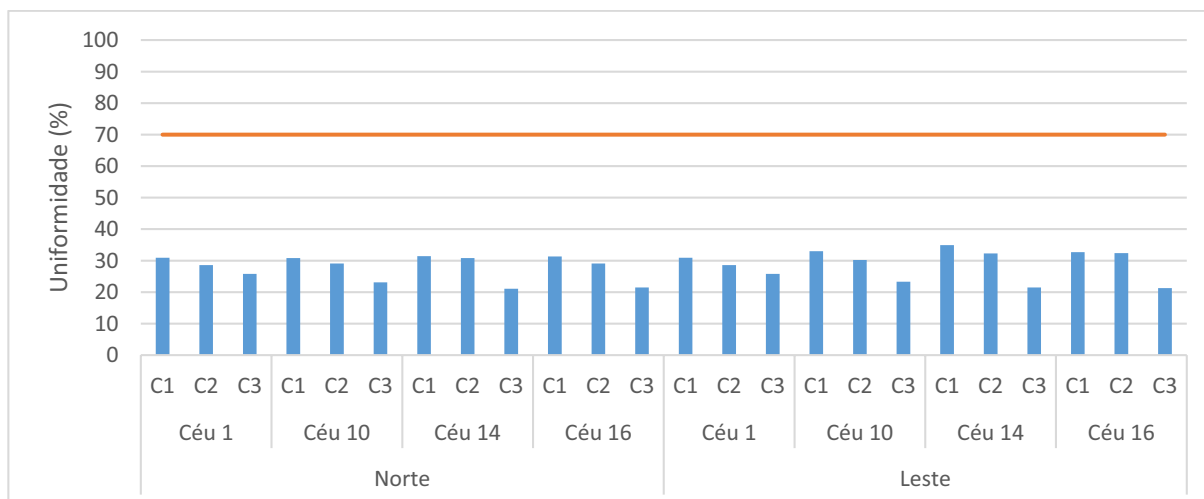


Figura 49 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos sem o PCL

Os valores de uniformidade, entretanto, são muito baixos e bem distantes do esperado, 70%, o que corrobora a necessidade de dispositivos de proteção solar para o ambiente, mesmo em situações de adensamento urbano.

A Figura 50 apresenta um gráfico em barras com a contribuição de cada componente para a iluminância global média. Observa-se que com a redução do fator de visão de céu há um aumento no percentual de luz solar direta que compõe a iluminância global, esse aumento acompanha uma redução das demais componentes. Tal fato pode ser melhor observado em comparações entre C2 e C3, onde há um aumento na componente de sol direto em todos os casos. Apenas no céu encoberto (1) em que não há luz solar direta observa-se um aumento no percentual da componente de céu direto, resultado da redução dos valores absolutos da refletida, fazendo com que a luz direta próxima à janela compreenda a maior parte da luz natural no plano de trabalho.

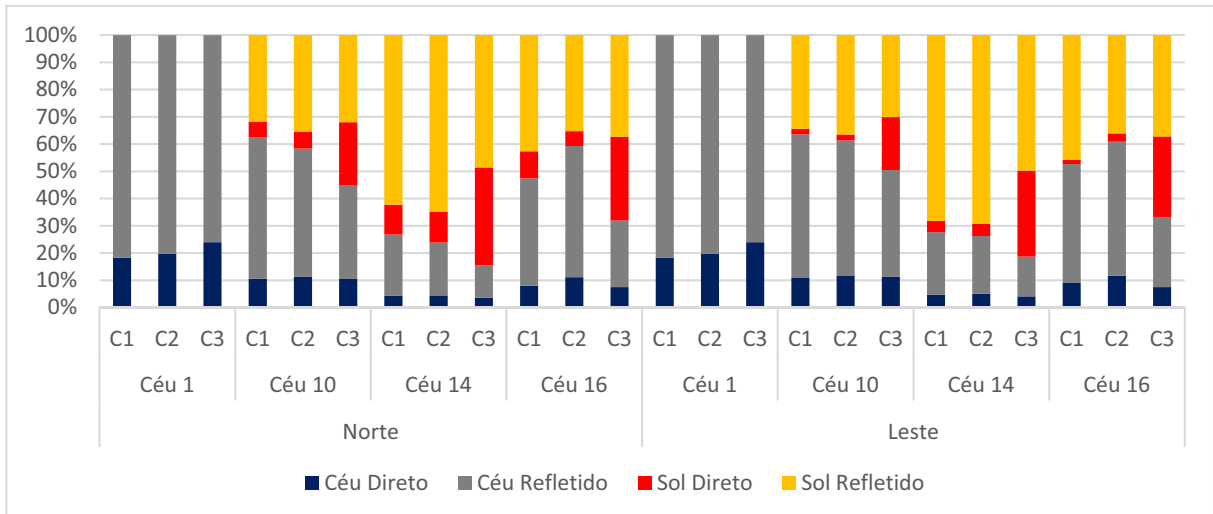


Figura 50 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos sem o painel de corte a laser

4.2.2 Modelo com PCL a 0°

Os resultados de média anual da componente global para o modelo com PCL a 0° é apresentado na Figura 51. A partir do gráfico, é possível observar uma tendência no comportamento dos resultados que será observada nos demais casos. Há uma redução na disponibilidade de luz natural nos ambientes. Do cenário 1 para o 2, tal redução é menor, chegando a no máximo 20,6% para a orientação leste com céu parcialmente encoberto (10). Já do cenário 2 para o 3, em que há maior redução do fator de visão de céu, as perdas em iluminância chegam ao máximo de 56,9% para o mesmo caso anterior.

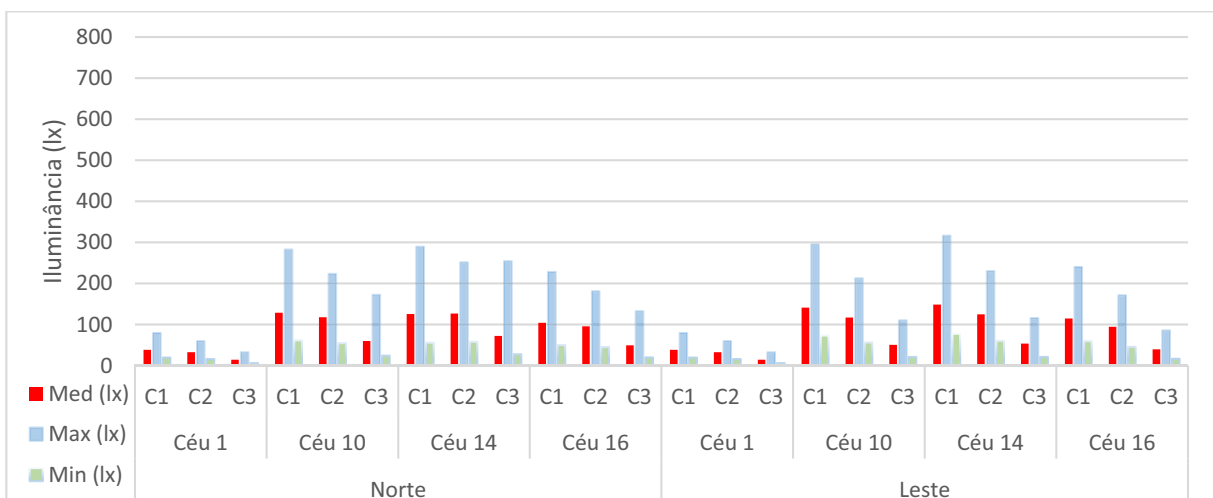


Figura 51 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 0°

Observa-se, também, que os valores de máximo se reduziram quando comparados ao modelo sem o painel de corte a laser. Tal redução evidencia que o painel em sua posição vertical funciona como um bom protetor solar, reduzindo a entrada de luz direta proveniente do sol e da porção de céu visível, fazendo com que a componente refletida corresponda à maior parte da luz no ambiente.

Para a uniformidade, foi encontrado comportamento semelhante, apresentado na Figura 52. Observa-se que entre C1 e C2 há uma redução de no máximo 7,9% para a orientação leste e céu parcialmente encoberto (10). Entre C2 e C3, observam-se maiores valores de redução, entre 10,8% e 15,6%. Para todos os casos, os níveis de uniformidade ainda foram abaixo no mínimo estipulado pela norma, mas tiveram um importante crescimento se comparado à situação de janela com vidro comum. Os maiores níveis de uniformidade encontrados foram para o céu encoberto, com máximo de 51,1%, e os menores valores encontrados para o céu claro, com 38,5%.

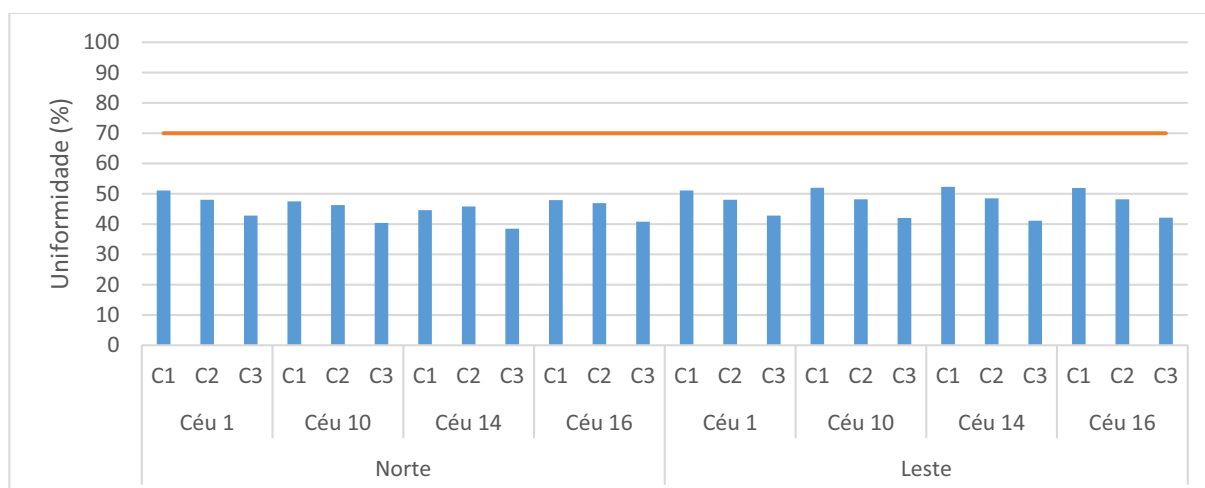


Figura 52 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 0°

A análise das componentes de luz natural apresentada na Figura 53 apresenta uma importante conclusão que explica o fato da uniformidade ter diminuído com a redução da visão de céu. Observa-se que apenas o cenário 3, com menor visão de céu, atingiu situações de incidência de luz solar direta, e apenas para a orientação norte. A análise ponto a ponto mostrou que, tendo em vista a trajetória aparente do sol nessa orientação, há períodos do ano em que há incidência de luz solar direta na segunda linha de pontos de análise. É possível que em outras situações, para os demais cenários, o mesmo efeito aconteça, entretanto, a distância entre os pontos e a reduzida dimensão da janela faz com que essa incidência não seja computada.

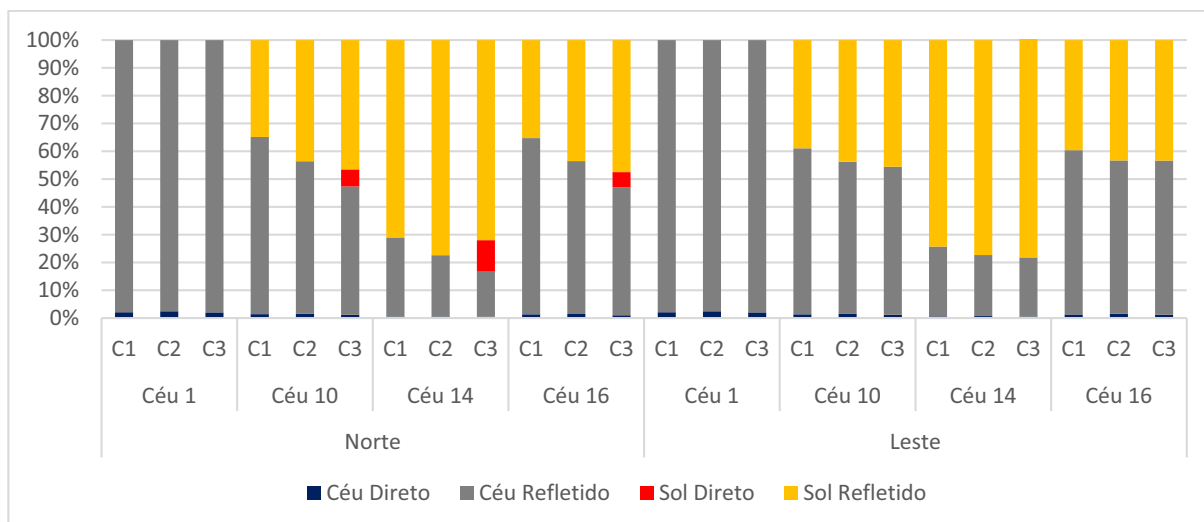


Figura 53 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 0°

Observa-se ainda que há um aumento da componente de sol refletido com a diminuição do fator de visão de céu em todos os casos, apontando que grande parte da luz natural que atravessa o painel nessa posição provém da reflexão da luz solar.

Uma importante análise a ser feita é a forma como os raios luminosos incidem no painel para cada uma de suas posições. A Figura 54 apresenta um painel de corte a laser posicionado na vertical, onde são evidenciados três setores. O setor superior, correspondente à 53° em relação ao plano do painel corresponde aos ângulos em que o raio luminoso obrigatoriamente passará por um processo de reflexão para entrar no ambiente. O setor correspondente aos 37° em relação à normal do plano do painel corresponde à faixa onde há uma probabilidade de o raio ser refletido nos cortes, ou de atravessar sem tal efeito. Ao passo que o ângulo de incidência se aproxima da normal a probabilidade do raio ser refletido diminui até o zero quando o raio incide normalmente ao plano do painel. Ainda há um terceiro setor, de menor dimensão, alinhado com as faces de corte do painel, em que todos os raios luminosos atravessam o elemento sem refletir nas superfícies de corte.

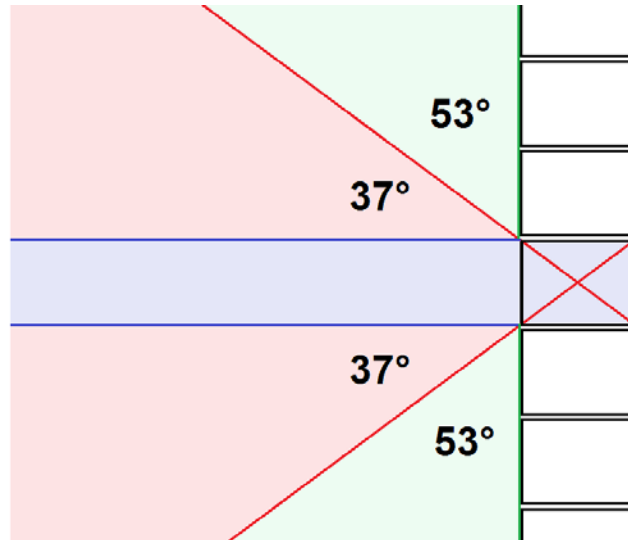


Figura 54 - Setores de admissão de raios luminosos no painel de corte a laser

É importante notar que no caso do painel posicionado à 0° os setores de admissão de luz estão todos voltados à edificação vizinha, como apresentado na Figura 55. Sendo assim, atesta-se o fato de que não houve possibilidade de entrada de luz solar direta em nenhum dos 3 cenários, fazendo com que toda a luz que atravesse o painel seja refletida pelas superfícies de corte.

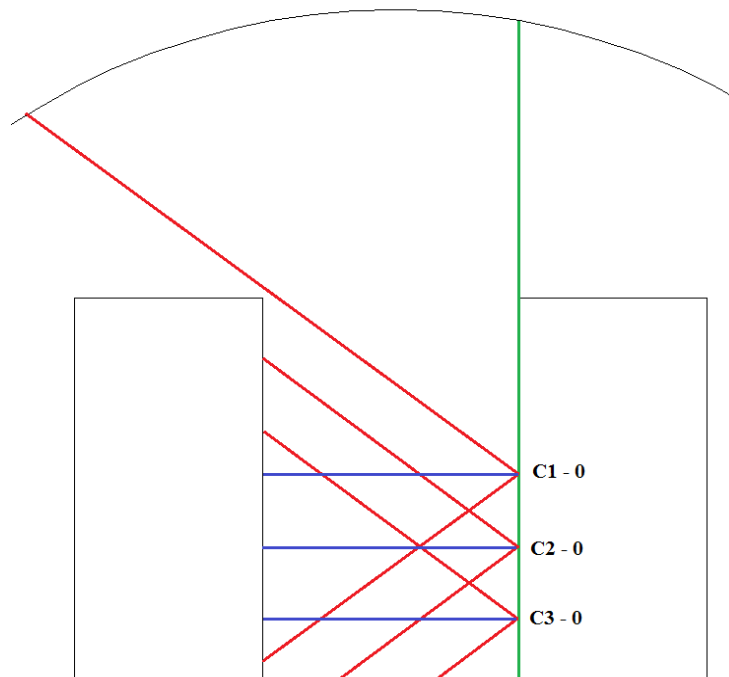


Figura 55 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser na vertical, nos três cenários propostos

4.2.3 Modelo com PCL a 15°

Para os modelos com o painel de corte a laser posicionados a 15°, os resultados são apresentados na Figura 56. Observa-se comportamentos diferentes das situações anteriores. Para a orientação leste, a tendência de redução dos valores de média, máximo e mínimo se mantém, atingindo um valor de redução média máxima de 35,4% (entre C1 e C2) e 72% (entre C2 e C3). Na mesma orientação, ocorreram picos de máximos, indicando entrada de luz direta, apenas para o cenário 1. Os valores de iluminância média encontrados, para todos os casos e orientações, foram maiores do que a posição do painel a 0°, indicando que a rotação do elemento permitiu a entrada de mais luz natural.

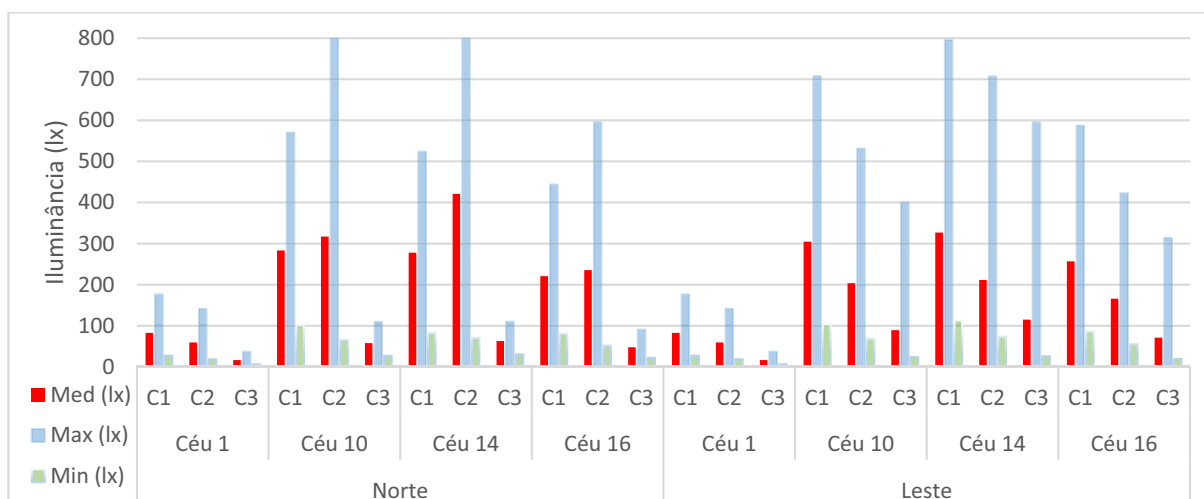


Figura 56 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 15°

Para a orientação norte, os resultados apresentaram um comportamento distinto do restante. Observa-se que para o céu encoberto (1) o comportamento acompanha os demais resultados, com uma redução gradual da iluminância seguida da redução do fator de visão de céu. Para os céus parcialmente encoberto (10) e claro (14) houve um aumento na iluminância média e máxima entre C1 e C2, e uma grande redução entre C2 e C3. A análise mais aprofundada dos resultados apontou que alguns pontos próximos à janela em C2 tiveram incidência de luz solar direta em alguns períodos do ano, fazendo com que houvesse um aumento da média. O mesmo resultado não se repete para os demais, tendo em vista que para tais dias em que houve entrada de luz direta ela não atingiu os pontos de análise, mas a região próxima a eles, não tendo sido computada tal incidência. Esse acontecimento mostra a importância de definir corretamente uma malha de pontos em que tais efeitos não sejam desprezados.

Os resultados para uniformidade de iluminância apresentaram um comportamento totalmente distinto dos demais, como pode ser visto na Figura 57. Em todos os modelos houve uma redução da uniformidade entre C1 e C2, de até 42% para a orientação norte e céu claro (14). Quando analisada a variação entre C2 e C3, observa-se que para a orientação norte há um aumento de até 65,2% na uniformidade, entretanto, o mesmo comportamento acontece na orientação leste apenas na situação de céu encoberto (1)

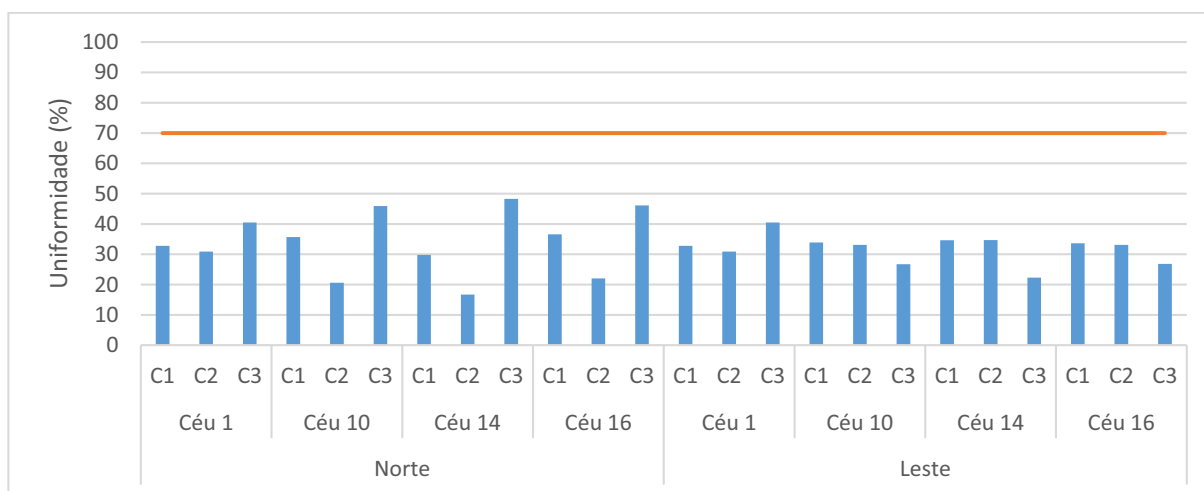


Figura 57 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 15°

O aumento na uniformidade do modelo com menor visão de céu acompanha uma grande redução da iluminância média, indicando que a posição a 15° consegue bloquear os raios solares diretos que incidiriam no interior do ambiente. A diferença na trajetória aparente do sol entre as orientações norte e leste fez com que o mesmo comportamento não fosse verificado, já que o cânion nessa orientação está sujeito a maiores períodos de insolação direta que na orientação norte.

O estudo das componentes de luz natural, apresentado na Figura 58, explica melhor os comportamentos verificados na análise da uniformidade. Observa-se que para a orientação norte, o cenário com menor visão de céu (C3) obteve níveis mínimos de entrada de luz solar direta, enquanto que os demais para a mesma orientação obtiveram níveis expressivos, o que explica o aumento na uniformidade em tais casos. Para a orientação leste, a análise das componentes aponta grande entrada de luz solar direta para os cenários com menor visão de céu.

É importante notar que o gráfico estudado trata de percentuais com relação à iluminância global. Como há uma redução de todas as componentes com a diminuição da visão de céu,

consequentemente, aquela componente que se mantém relativamente constante se comparada às demais posições passa a ter maior significância na iluminância global.

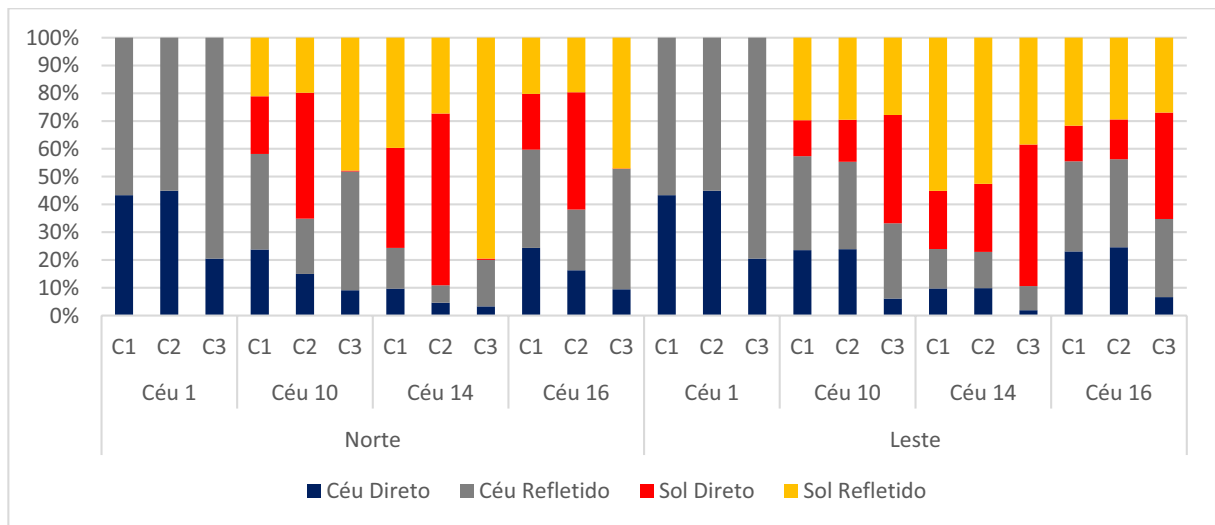


Figura 58 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 15°

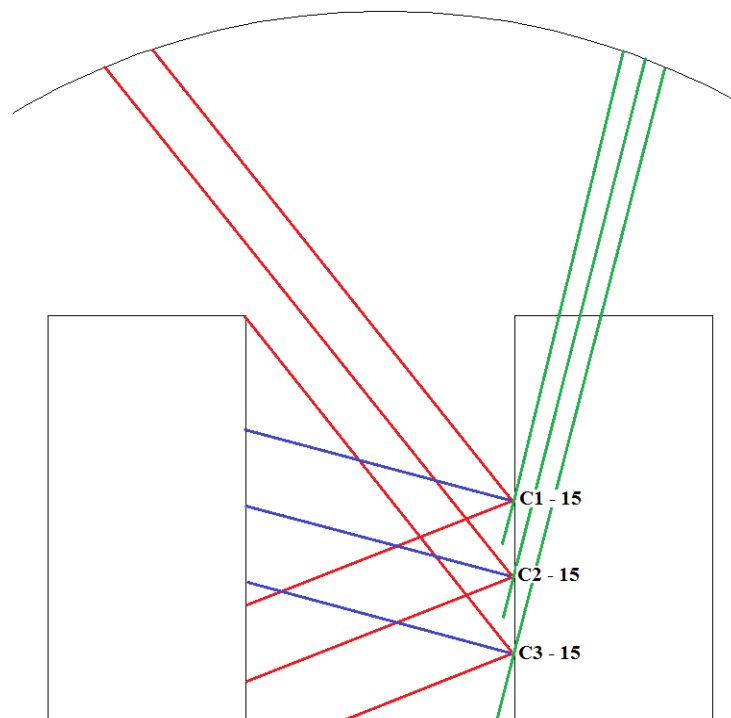


Figura 59 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 15°, nos três cenários propostos

A Figura 59 apresenta os setores de admissão de luz para o painel de corte a laser. Observa-se que os cenários 1 e 2 têm parte do setor com céu visível, o que não acontece no cenário 3. Essa constatação indica que a posição a quinze graus funciona bem quando não há

visão de céu pelo painel, fazendo com que toda a luz incidente diretamente seja refletida para o interior.

4.2.4 Modelo com PCL a 30°

A posição de 30° é a recomendada pelo desenvolvedor do elemento para cenários de adensamento urbano, como citado anteriormente, e apresentou um comportamento distinto das demais posições. Os resultados com o painel de corte a laser a 30° é apresentado na Figura 60. Observam-se picos de iluminância máxima para a orientação norte, acompanhados de uma redução nos valores médios na ordem de 42% para o céu parcialmente encoberto (10). É importante notar que os picos encontrados na orientação leste foram menores, consequentemente tal orientação obteve valores médios bem menores.

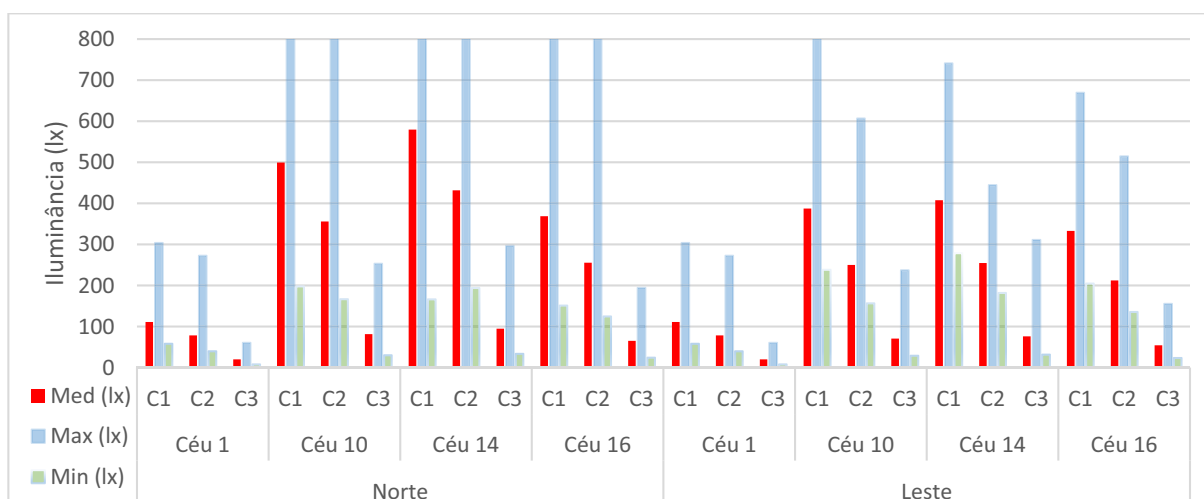


Figura 60 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 30°

O cenário 3 foi o que obteve os menores níveis de iluminância para todas as situações. Os resultados para a uniformidade de iluminância são apresentados na Figura 61 e apresentam comportamento distinto dos demais. Observa-se que a redução do fator de céu é acompanhada pela redução nos níveis médios de iluminância, entretanto, a uniformidade não acompanha o mesmo comportamento. O cenário 2 obteve maior uniformidade, principalmente para a orientação norte, chegando a ser até 18,2% maior que os demais. Na orientação leste, esses resultados são menos expressivos.

Mesmo ocorrendo picos de iluminância, os resultados para uniformidade foram os melhores encontrados entre todas as posições de painel estudadas. A orientação leste, nesse caso, obteve os melhores valores.

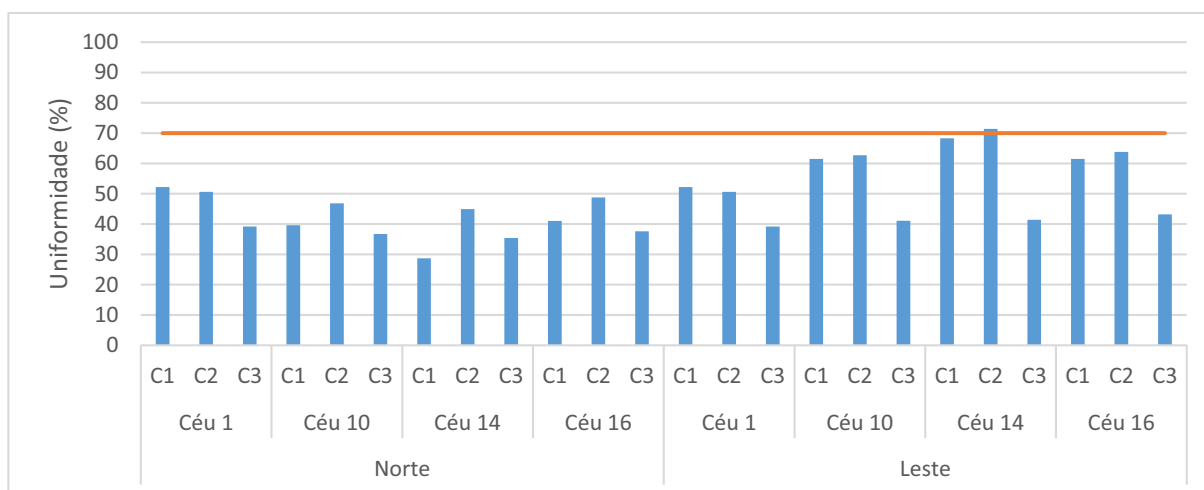


Figura 61 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 30°

Ao analisar o diagrama das componentes de luz natural, apresentado na Figura 62, observa-se que o comportamento diferenciado de C2 não mais é evidente. Percebe-se gradual redução dos níveis de sol direto ao passo que se reduz a visão de céu. É válido ressaltar que a orientação leste, que obteve os maiores índices de uniformidade, foi aquela que apresentou menores percentuais de luz solar direta – e maiores para luz do sol e do céu refletida.

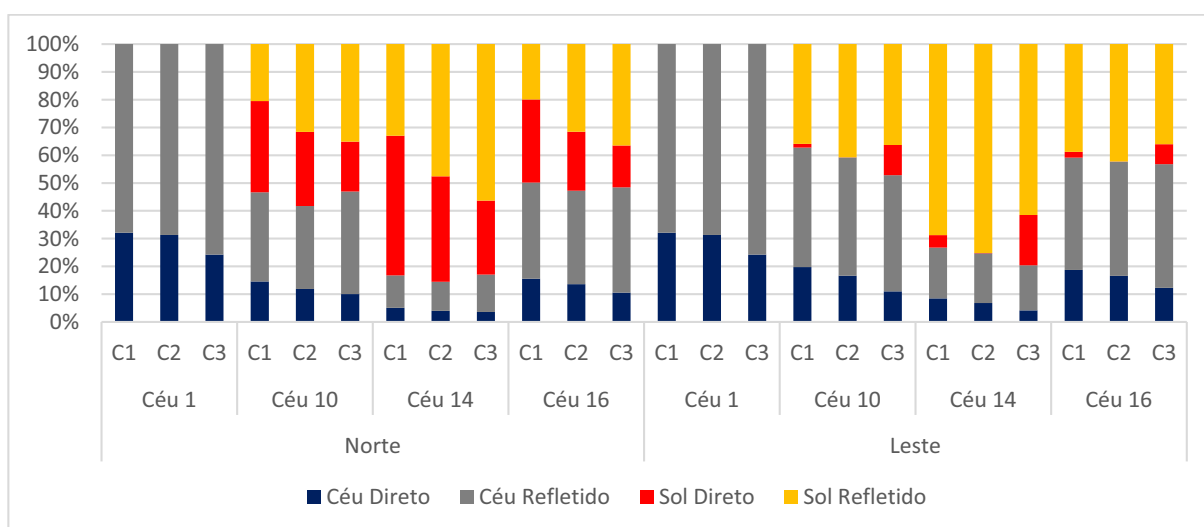


Figura 62 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 15°

Quando se analisa os setores de admissão do painel para a posição a 30° , apresentado na Figura 63, observa-se que nos três cenários já há visão de céu, permitindo que se tenha a possibilidade da entrada de luz solar direta, fato observado no conjunto de resultados verificado anteriormente.

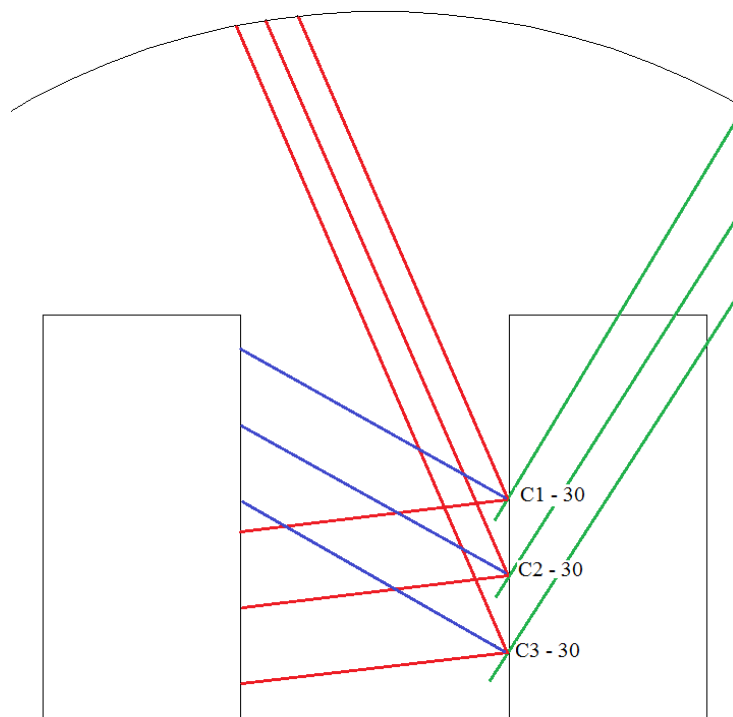


Figura 63 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 30° , nos três cenários propostos

4.2.5 Modelo com PCL a 45°

A posição a 45° é a que mais se aproxima da posição ideal apontada pelo desenvolvedor do elemento para situações de entorno desobstruído – seus resultados para iluminância são apresentados na Figura 64. O comportamento quanto à iluminância muito se assemelha ao modelo anterior. Houve, também, nessa situação, entrada de luz solar direta pelo painel, o que resultou em baixos índices de uniformidade, apontados na Figura 65.

Em todos os casos, excetuando o céu dinâmico (16), houve redução da iluminância média com a redução da visão de céu nos cenários, comportamento semelhante à posição a 30° . Observa-se que a partir dos 30° haverá entrada de luz solar direta, pois a visão desobstruída do

painel está praticamente toda voltada para a porção de céu visível, como será apresentado na Figura 67.

A redução da iluminância média entre C1 e C2 é de, em média, 12,5%, já entre C2 e C3 é de 72,5%. Tal comportamento atesta que nos dois primeiros cenários há entrada de luz solar direta – e que essa componente é responsável pelos altos níveis de iluminância.

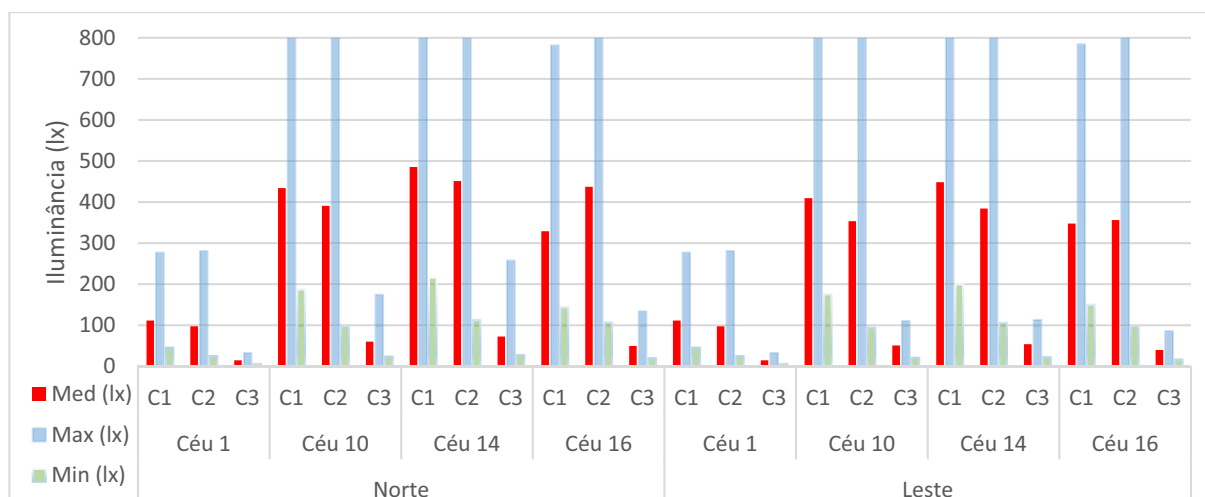


Figura 64 - Gráfico de Média anual global, máximos e mínimos, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 45°

Os resultados para uniformidade da iluminância apresentou um comportamento totalmente distinto dos demais casos. Em todas as situações houve uma constância nos comportamentos e nos níveis atingidos, não variando entre si mais do que 12% para o mesmo cenário. Ao comparar C1 e C3 quanto à iluminância média e a uniformidade, observa-se que o painel conseguiu reduzir significativamente os picos de iluminância e conseguiu atingir uniformidade ligeiramente melhor. Tais resultados serão melhores entendidos na análise por componentes. Nesse caso, os valores de uniformidade atingidos ficaram muito abaixo do esperado.

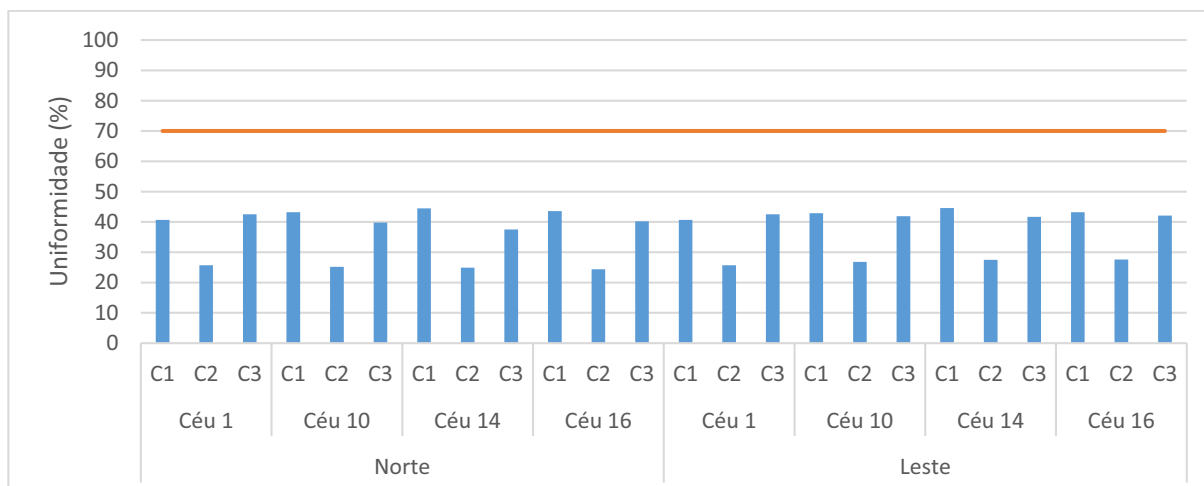


Figura 65 - Gráfico de uniformidade, para os casos estudados, nos 4 tipos de céu e nas duas orientações propostas para os modelos com PCL a 45°

A análise das componentes de luz natural, apresentada na Figura 66, aponta que há um aumento na componente de céu refletido entre C2 e C3, o que explica o fato da uniformidade ter crescido. Entretanto, observa-se um aumento também no percentual de sol direto. Para o céu claro, a componente predominante, nas duas orientações, é a de sol refletido, indicando que o painel conseguiu refletir grande quantidade da luz incidente nele para o interior do ambiente.

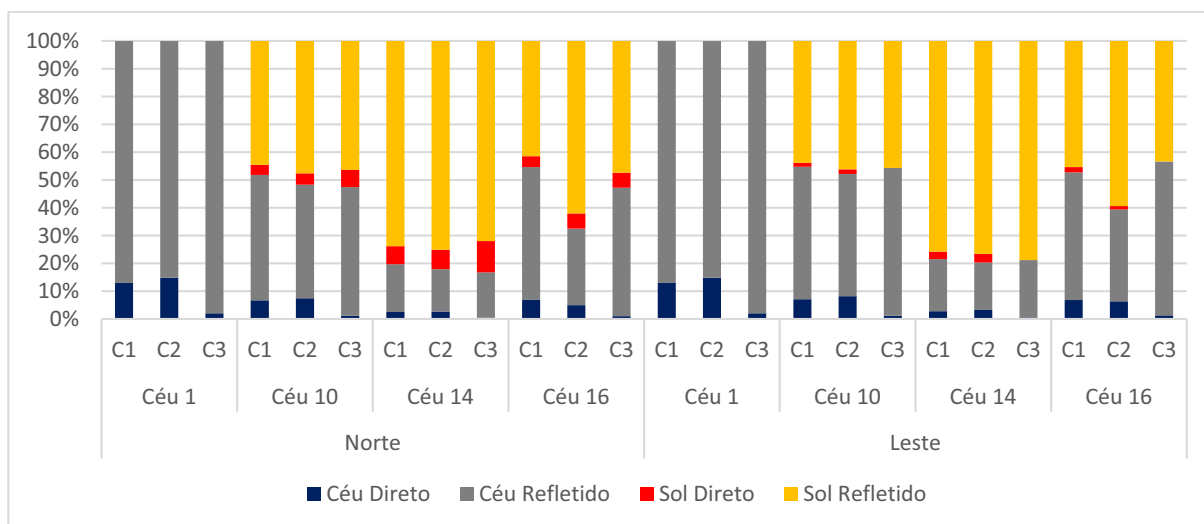


Figura 66 - Percentual das componentes de luz natural na iluminância média anual global para os modelos com o painel de corte a laser a 45°

Na posição a 45°, os setores de admissão de luz natural para os três cenários, como apresentados na Figura 67, estão totalmente expostos aos raios solares diretos. Entretanto, o percentual de luz solar direta é expressamente menor que nos casos anteriores, atestando que a

posição a 45° , mesmo com ganhos pequenos em uniformidade, conseguiu reduzir consideravelmente a incidência de luz solar direta no ambiente.

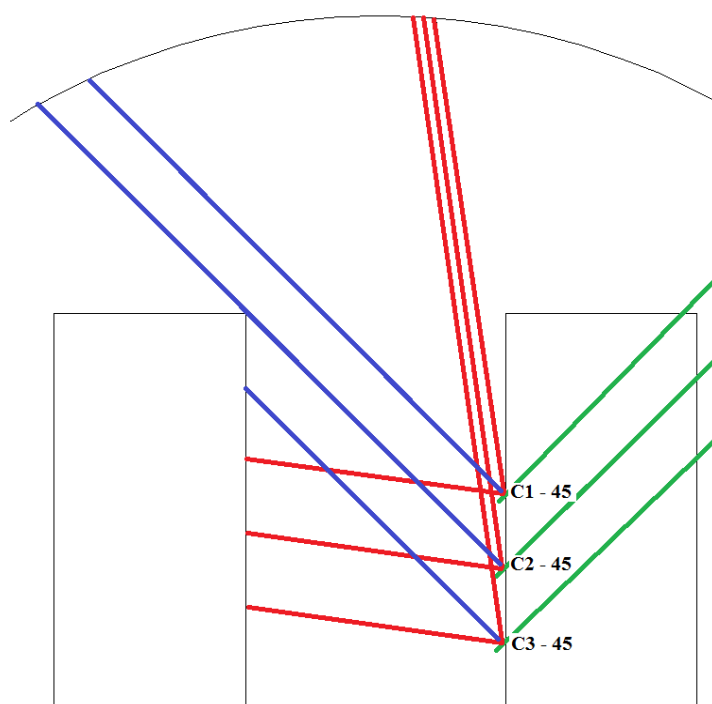


Figura 67 - Setores de admissão de luz para o painel de corte a laser a 45° , nos três cenários propostos

4.2.6 Síntese dos Resultados

A análise completa dos resultados aponta que a adição do painel de corte a laser aumentou a uniformidade para a maioria dos casos, salvo exceções pontuais, seja pelo bloqueio da luz solar direta ou pelo redirecionamento da luz incidente para o interior do ambiente. Os maiores valores de uniformidade foram encontrados para a orientação Leste, na posição do painel a 30° , e na orientação norte com o painel a 0°

Quando o painel de corte a laser é adicionado na vertical, há uma tendência de redução dos valores médios, com aumento na uniformidade da iluminância. Esse comportamento foi atestado pela redução na componente de sol direto, mostrando que o elemento funciona como um protetor solar eficiente nessa posição. Ao passo em que o painel vai se inclinando, esse comportamento tende a mudar, passando a posições em que há a presença de luz solar direta dentro dos ambientes.

Observa-se que na posição a 15° foram encontrados os maiores níveis de sol direto dentre as estudadas, reduzindo a uniformidade da luz no ambiente. Apenas o cenário 3, com menor visão de céu, não teve entrada de luz solar, mas não pela posição do elemento, e sim pela obstrução de entorno que impedia a entrada para esse ângulo.

O elemento a 30° e a 45° obteve os melhores resultados quanto a ganho de iluminância e de uniformidade. A 30° a abertura voltada a norte permaneceu com incidência de luz solar direta, já a leste não houve tal evento. Na orientação leste, a iluminância manteve-se em valores próximos da situação sem o painel, entretanto com uniformidade 32% maior, em média. A posição a 45° apresentou os menores índices de ocorrência de sol direto e as maiores contribuições de sol refletido, sendo as médias anuais globais as mais altas atingidas dentre todos os cenários estudados.

É importante notar que a ocorrência de sol direto em alguns modelos, conforme explicada anteriormente, possui relação direta com o tamanho da abertura e a distância entre os pontos da malha simulada. Como a abertura possui pequena dimensão, e a posição solar em que há incidência de sol direto faz com que essa faixa dentro do ambiente seja estreita, nem sempre os pontos de análise, para o intervalo de horas utilizado, conseguem identificar tal fenômeno.

Outra questão importante é que nem sempre a redução do fator de visão de céu foi acompanhada pela percepção de uma tendência nos resultados. Em alguns casos, a contínua redução de visão de céu entre C1, C2 e C3 não foi acompanhada pelo aumento ou redução contínuos da uniformidade ou das médias anuais globais, como acontece para a uniformidade na maioria das posições do painel de corte a laser. Esse comportamento deverá ser observado também na análise estatística seguinte. Na posição a 15° os maiores valores de uniformidade são encontrados em C2, já com o elemento a 30° os maiores valores encontram-se em C3. Tal comportamento pode ser explicado pela questão já abordada da malha de pontos.

Esses resultados sugerem uma relação entre o fator de visão de céu e o posicionamento do painel, entretanto a análise estatística dos resultados, apresentada no capítulo seguinte, poderá verificar de forma mais precisa se o comportamento condiz com a análise exploratória realizada.

4.3 Avaliação Estatística dos Modelos

Em uma segunda fase de análise, serão estudados os dados utilizando a análise de agrupamentos da estatística multivariada e as matrizes de correlação entre os grupos encontrados. Inicialmente, será analisado o conjunto completo de dados, seguindo com a verificação dos grupos. Posteriormente, ocorrerá a análise em cada agrupamento e, por fim, a conclusão das análises.

4.3.1 Correlação – Conjunto Completo de Dados

Observou-se nas análises anteriores que todo o conjunto de dados possui comportamentos diversos, e que até então não é possível determinar uma regra geral de comportamento. Entretanto, algumas conclusões podem ser tomadas a partir da análise da correlação entre variáveis para o conjunto de dados. A Tabela 5 apresenta a matriz de correlação para o conjunto de dados completo. Observa-se que as correlações obtidas são baixas, chegando a no máximo 0,59 entre o fator de visão de céu e os níveis de iluminância média e mínima.

Tabela 5 - Matriz de Correlação para o conjunto de dados completo

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1,00							
SVF	0,00	1,00						
Céu	0,00	0,00	1,00					
Orientação	0,00	0,00	0,00	1,00				
Ilum. Med	0,38	0,56	0,40	-0,08	1,00			
Ilum. Max	0,35	0,42	0,34	-0,15	0,91	1,00		
Ilum. Min	0,34	0,59	0,37	0,03	0,88	0,72	1,00	
Uniformidade	-0,14	0,18	-0,01	0,17	-0,12	-0,24	0,30	1,00

Observa-se, também, correlações positivas entre o fator de visão de céu e todas as variáveis analisadas, indicando que com sua redução, diminui-se também a iluminância no interior do ambiente. Essa correlação não é tão expressiva tendo em vista a presença do painel de corte a laser. Houve apenas um caso de correlação negativa, indicando um comportamento

inversamente proporcional entre as variáveis ângulo de aplicação e uniformidade, entretanto, o valor é muito pequeno para ser considerado um comportamento expressivo.

4.3.2 Análise de Agrupamento

Para que possa ser melhor estudada a relação entre as variáveis, faz-se necessário a identificação dos grupos de comportamentos encontrados nos modelos. Para tanto, foi utilizado a plataforma ActionStat® para Excel®, que permite a análise estatística multivariada de dados. Foi utilizada uma análise com agrupamentos pelo método hierárquico completo, por distâncias euclidianas. O dendograma com os agrupamentos é apresentado na Figura 68. Escolheu-se a divisão de cinco grupos, que melhor representaram o conjunto dos comportamentos verificados na análise exploratória dos resultados. A tabela com a descrição dos grupos está descrita no Apêndice 4. Nessa etapa de análise foi utilizado o mesmo conjunto de dados das anteriores.

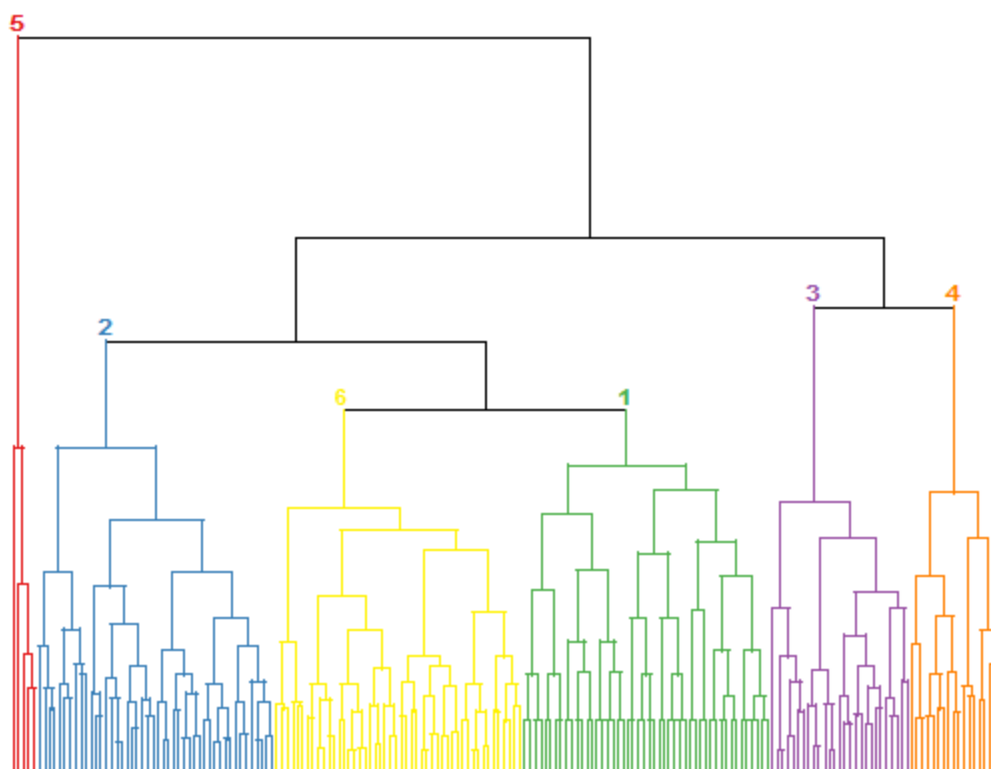


Figura 68 - Dendograma com destaque para os grupos encontrados a partir da análise de agrupamento

Os modelos separados por grupo, conforme a análise anterior, são apresentados na Tabela 6. Observa-se que os resultados para céu encoberto formam um grupo a parte, mostrando que

para esta condição de céu a aplicação do painel de corte a laser gera resultados diferentes de situações com incidência de sol direto. O cenário 3, com menor visão de céu, também foi agrupado em um único conjunto, apontando que essa situação de menor visão de céu se distingue das demais.

Tabela 6 – Síntese dos casos por grupo encontrado na análise por agrupamento

Grupo	Casos Agrupados
1	Todos os resultados para o céu encoberto (1)
2	Todos os resultados relativos aos cenários 1 e 2, com painel de corte a laser a 0° em todas as orientações, excetuando os com céu encoberto (1)
3	Resultados relativos aos cenários 1 com painel de corte a laser a 15° e os relativos ao cenário 2, com painel de corte a laser a 15° e a 45°, excetuando os com céu encoberto (1)
4	Resultados relativos aos cenários 1 e 2 com painel de corte a laser a 30° e 45°, excetuando os com céu encoberto (1)
5	Resultados com painel de corte a laser a 30° nos cenários 1 e 2, para a orientação Norte, excetuando os com céu encoberto (1)
6	Todos os resultados relativos aos cenários 3, excetuando os com céu encoberto (1)

Os agrupamentos serão utilizados em uma segunda fase de análise dos resultados, onde serão verificados o comportamento das variáveis envolvidas para conjunto de simulações.

4.3.3 Grupo 1

O primeiro grupo estudado corresponde a todas as simulações em que foi utilizado o céu encoberto, e a matriz de correlação para este caso é apresentada na Tabela 7. Observa-se que a relação entre o fator de visão de céu e as variáveis estudadas é maior que a relação entre o ângulo e tais variáveis. Os resultados apontam que com o aumento do ângulo de aplicação do painel há um incremento da iluminância e uma redução da uniformidade, comportamento este que pôde ser verificado na análise exploratória dos dados. A redução na uniformidade é mais significativa para as aplicações a 15° e 30°.

Tabela 7 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 1

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1,00							
SVF	0	1,00						
Céu	0	0	1,00					
Orientação	0	0	0	1,00				
Ilum. Med	0,47	0,77	0,00	0,00	1,00			
Ilum. Max	0,54	0,65	0,00	0,00	0,97	1,00		
Ilum. Min	0,37	0,77	0,00	0,00	0,91	0,91	1,00	
Uniformidade	-0,28	0,15	0,00	0,00	-0,13	-0,07	0,27	1,00

Os resultados de correlação entre o fator de visão de céu e as variáveis estudadas foram mais expressivos que os demais, com correlações de até 0,77 para a média. Tais valores mostram que há uma forte relação entre a visão de céu e a iluminância dentro dos ambientes. Na análise exploratória, percebe-se que esse aumento ocorre principalmente pelo incremento na componente refletida da luz.

Para o primeiro grupo, a relação mais importante se dá entre fator de visão de céu e a iluminância média, máxima e mínima. A uniformidade, nesse conjunto, não apresentou significativa correlação com as demais variáveis estudadas.

4.3.4 Grupo 2

Para o segundo conjunto de dados, a matriz de correlação é apresentada na Tabela 8. Para o esse grupo, houve correlações expressivas entre o fator de visão de céu e as iluminâncias média, máxima e mínima, bem como a uniformidade. Apenas para esse caso a correlação entre céu e a iluminância média apresentou valores acima de 0,5 – indicando que há uma importante relação entre o tipo de céu e a quantidade de luz no interior do ambiente quando o painel é posicionado na vertical.

A análise aprofundada dos dados desse grupo mostra que em nenhum dos casos houve ocorrência de sol direto nos ambientes, fazendo com que a relação entre o ângulo de aplicação do painel e a iluminância no ambiente resultassem em maiores valores de correlação. Importante notar que para a uniformidade, mesmo que o valor de correlação tenha sido baixo,

ele se apresentou positivo, o que o aumento no ângulo de aplicação do painel, caso não haja incidência de sol direto, gera um aumento de uniformidade, mesmo que pequeno.

Tabela 8 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 2

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1							
SVF	0	1						
Céu	0	0	1					
Orientação	0	0	0	1				
Ilum. Med	0	0,46	-0,51	0,22	1,00			
Ilum. Max	0	0,73	-0,36	0,02	0,92	1,00		
Ilum. Min	0	0,51	-0,42	0,43	0,95	0,86	1,00	
Uniformidade	0	0,43	0,01	0,77	0,39	0,31	0,65	1,00

4.3.5 Grupo 3

Na análise exploratória, o grupo 3 de resultados foi o que apresentou os menores níveis de uniformidade entre todas as posições de aplicação do painel de corte a laser. O conjunto de resultados de correlação é apresentada na Tabela 9. Observa-se uma correlação forte em duas situações: a primeira entre o ângulo de aplicação do painel e a iluminância, e a segunda entre o fator de visão de céu e a uniformidade da iluminância.

Tabela 9 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 3

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1							
SVF	-0,5	1						
Céu	0	0	1					
Orientação	0	0	0	1				
Ilum. Med	0,72	-0,28	-0,09	-0,31	1,00			
Ilum. Max	0,74	-0,52	-0,02	-0,21	0,95	1,00		
Ilum. Min	0,58	0,28	-0,14	0,08	0,65	0,51	1,00	
Uniformidade	-0,36	0,64	0,00	0,48	-0,62	-0,68	0,16	1,00

Na primeira, o aumento no ângulo, para os modelos, resulta em um aumento da iluminância no interior do ambiente. Na segunda, o aumento da visão de céu acompanha um aumento na uniformidade. Essa segunda conclusão é observada na análise exploratória ao

perceber que os cenários com maior visão de céu obtiveram uma menor entrada de luz solar direta que os casos com menor visão de céu. Tal fato foi explicado anteriormente pela questão da malha de pontos utilizada e a dimensão da réstia de sol gerada pela pequena abertura.

Por último, é importante observar que o aumento na visão de céu acarretou também uma redução nos valores de máximos, pelo efeito já citado anteriormente.

4.3.6 Grupo 4

O grupo quatro na análise exploratória dos dados foi o que atingiu os maiores níveis de iluminância, acompanhados dos maiores valores de uniformidade. Os dois únicos cenários em que a uniformidade ultrapassou os 70% estão nesse grupo. Importante notar que os melhores resultados novamente acontecem com a aplicação a 30° e a 45° do ângulo de aplicação do painel. Os resultados de correlação entre as variáveis estudadas para o grupo são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 4

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1							
SVF	0,62	1,00						
Céu	-0,08	-0,12	1,00					
Orientação	-0,39	-0,08	-0,12	1,00				
Ilum. Med	0,65	0,85	-0,32	-0,20	1,00			
Ilum. Max	0,72	0,68	-0,26	-0,55	0,85	1,00		
Ilum. Min	-0,12	0,54	-0,30	0,26	0,63	0,24	1,00	
Uniformidade	-0,89	-0,49	0,01	0,55	-0,52	-0,80	0,32	1,00

Observa-se uma importante relação entre o ângulo de aplicação do painel de corte a laser e a uniformidade da iluminância. Ao passo que o ângulo aumenta, para o grupo estudado, a uniformidade tende a diminuir. Esse efeito é visto na análise exploratória ao perceber a redução na componente de sol direto com a variação dos cenários. O fator de visão de céu obteve um alto índice de correlação entre a iluminância média, o que mostra que nos casos estudados o aumento da visão de céu acarreta um aumento nos valores de média, mas sem comprometer os níveis de uniformidade.

4.3.7 Grupo 5

O grupo 5 foi o que apresentou o menor conjunto de simulações, compreendendo seis situações com a abertura voltada a norte e painel de corte a laser posicionado a 30°. A variável que obteve relação mais expressiva foi o fator de visão de céu entre a média da iluminância e a uniformidade. Para o grupo, ao passo em que o fator de visão de céu aumenta o valor da iluminância média aumenta, mas a uniformidade tende a diminuir.

Tabela 11 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 5

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1							
SVF	0	1						
Céu	0	0,27	1,00					
Orientação	0	0,00	0,00	1,00				
Ilum. Med	0	0,52	0,00	0,00	1,00			
Ilum. Max	0	0,58	0,12	0,00	0,96	1,00		
Ilum. Min	0	-0,23	-0,49	0,00	0,32	0,04	1,00	
Uniformidade	0	-0,73	-0,30	0,00	-0,87	-0,96	0,18	1,00

4.3.8 Grupo 6

O grupo 6 compreende a situação do cenário 3, em que se encontra o menor fator de visão de céu. O fato da análise de agrupamento ter separado esse cenário dos demais como um comportamento distinto permite concluir que para situações em que a visão de céu é reduzida o comportamento do painel de corte a laser deverá ser tratado de forma diferenciada de uma situação desobstruída ou com poucas obstruções. A Tabela 12 apresenta os resultados de correlação entre as variáveis estudadas.

É interessante notar que as correlações encontradas para este grupo não apresentaram valores significativos que possam indicar algum tipo de comportamento. Os valores de correlação chegam a no máximo 0,33 entre céu e mínimo, entretanto muito abaixo do mínimo necessário para apontar algum comportamento. Observa-se que na situação de reduzida visão

de céu, a relação entre o ângulo de aplicação do painel e a iluminância no ambiente possuem pouca relação.

Tabela 12 - Matriz de Correlação para o grupo de dados 6

	Ângulo	SVF	Céu	Orient.	Ilum. Med.	Ilum. Max.	Ilum. Min.	Unif.
Ângulo	1							
SVF	0	1						
Céu	0	0	1					
Orientação	0,00	0,00	0,00	1,00				
Ilum. Med	0,01	0,00	-0,21	-0,02	1,00			
Ilum. Max	-0,03	0,00	-0,09	0,16	0,94	1,00		
Ilum. Min	0,11	0,00	-0,33	-0,36	0,65	0,41	1,00	
Uniformidade	0,04	0,00	0,02	-0,24	-0,75	-0,88	-0,02	1

A análise exploratória dos resultados aponta que este cenário obteve um comportamento diferente dos demais, indicando que a reduzida visão de céu deva ser tratada de forma isolada dos demais casos. Vale ressaltar que mesmo nessa situação o cenário 3 com a aplicação do elemento teve a luz direta do sol bloqueada pelo painel, entretanto a pouca luz que chega ao painel, para as análises atuais, talvez não seja suficiente para gerar ganhos expressivos.

4.3.9 Conclusão da Análise Estatística

A análise estatística dos dados conseguiu identificar comportamentos que seriam difíceis de serem encontrados na análise exploratória. Observa-se uma correlação entre o fator de visão de céu e os valores de iluminância média, entretanto, a uniformidade, apenas em alguns casos específicos, possui o mesmo comportamento.

Na análise de agrupamentos os conjuntos de modelos gerados pelo método estatístico, utilizando a comparação entre todas as variáveis, dividiu-se o conjunto total em seis grupos distintos. É importante notar que as simulações com céu encoberto foram reunidas em um único grupo, bem como as do cenário 3, com menor visão de céu, apontando que essas duas situações possuem comportamento distinto dos demais.

Os resultados para o painel na vertical, foram agrupados em apenas um conjunto, apresentando que nesta posição o elemento gera um comportamento distinto, o de proteção solar, como identificado na análise exploratória. As simulações que apresentaram os maiores coeficientes de correlação foram aquelas em que o elemento foi posicionado a 30° ou a 45°, reafirmando que essas são as melhores posições para ganho em iluminância e uniformidade.

A análise estatística realizada de forma dissociada com os resultados averiguados na análise exploratória apresentaria conclusões que inicialmente não teriam sentido para o grupo de dados encontrados, apresentando a importância de realiza-las conjuntamente.

5. CONCLUSÃO

A dissertação apresentada analisou comparativamente a interferência da visão de céu na aplicação do painel de corte a laser em um cenário urbano na cidade de Maceió-AL. Os resultados foram obtidos em três etapas: o desenvolvimento do algoritmo computacional capaz de simular o elemento de estudo, a simulação computacional e a análise estatística dos resultados.

Para que fosse possível estudar a aplicação do painel de corte a laser em uma situação de verticalização na cidade de Maceió, fez-se necessário o desenvolvimento de um algoritmo computacional que permitisse o estudo no *software* TropLux. O desenvolvimento do algoritmo, e a escolha da formulação utilizada, obteve sucesso em simular as características óticas do elemento prismático.

Para a validação de tal algoritmo, foram utilizados diversos referenciais teóricos que já disponibilizavam dados de transmitância e refletância direcionais, entretanto, os próprios dados da literatura, mesmo tratando-se do mesmo material, possuíam divergências por vezes maiores do que as encontradas entre o modelo desenvolvido e os já existentes. As diferenças de resultados explicam-se pelas diferentes metodologias utilizadas para a coleta de dados, bem como nas imperfeições físicas dos materiais utilizados nos testes em laboratórios.

A análise inicial dos dados apontou que a aplicação do painel de corte a laser na posição vertical reduziu significativamente a visão de céu dos pontos contidos no plano de trabalho, indicando que sua aplicação nesta posição possui um bom funcionamento quanto à proteção solar, resultado que será reencontrado nas análises posteriores.

A análise quantitativa dos dados por meio da comparação entre o funcionamento do algoritmo para o vidro plano, o vidro prismático e o painel de corte a laser apontou que o algoritmo conseguiu reproduzir o comportamento do material encontrado na literatura, com valores de R^2 não inferiores a 0,76 para o vidro prismático. O painel de corte a laser obteve os melhores índices de correlação, maiores que 0,9.

Os resultados da primeira fase apontam que o algoritmo consegue simular com precisão elementos prismáticos, e pode ser utilizado na análise de outros materiais além do painel de corte a laser. A utilização do algoritmo no programa TropLux acarretou um aumento no tempo de processamento dos dados, tendo em vista o aumento no número de eventos de reflexão e

transmissão com a colocação do material. Para efeitos de comparação, utilizando um computador com processador Intel Core I3 2,4GHz, com 3Gb de memória RAM e sistema operacional Windows 10 x64 o tempo de processamento médio por ponto de um ambiente com abertura sem o painel foi de 30 minutos, já com a aplicação do painel esse tempo aumentou para 3h 45min.

A análise da aplicação do painel de corte a laser nos cenários propostos apresentou diversos comportamentos. A análise completa mostra que a aplicação do elemento acarreta um aumento na uniformidade da iluminância em todos os casos estudados, esse aumento pode chegar a até 42% para a orientação leste. O painel na posição vertical gera um aumento de uniformidade pelo bloqueio da luz solar direta advinda do cânion urbano, o que atesta que o uso do elemento na vertical pode funcionar como um protetor solar na janela, protegendo contra os raios luminosos que se concentrariam na parte próxima à janela, mas garantindo visão do exterior.

Em outras situações, como o painel a 30 e a 45 graus, os ganhos em uniformidade vêm acompanhados de aumento na iluminância média, o que aponta que tais posições são as mais indicadas para a aplicação do elemento. É importante notar que o desenvolvedor do painel de corte a laser recomenda a aplicação em cenários urbanos do painel a 30°, o que foi atestado com os maiores índices de uniformidade nesta posição, entretanto os resultados da aplicação a 45° foram os que obtiveram a menor incidência de luz solar direta nos ambientes.

Os valores de iluminância média encontrados para os elementos às aplicações a 30° e a 45° não possuem diferenças significativas para a orientação Leste, mas apenas para a Norte, de até 22%. Na análise estatística, as duas posições de painel foram reunidas no mesmo grupo, indicando comportamento semelhante. A partir das análises, é possível afirmar que para visões de céu maiores que 30%, para os cenários estudados, a aplicação do painel a 30° dá melhores resultados quanto à uniformidade, já a 45° produz melhor proteção solar. Em locais onde há maior ocorrência de sol sem nebulosidade é mais interessante a aplicação a 45°, já em situações onde predomina sol parcialmente encoberto a posição a 30° gera os maiores ganhos em iluminância e uniformidade.

Os resultados a 15° obtiveram os maiores índices de luz solar direta, resultando em picos de iluminância ao longo do dia no interior do ambiente, o que inviabiliza a sua aplicação nessa posição. Apenas o cenário com menor fator de visão de céu não teve entrada de luz solar direta, tendo em vista que o entorno funcionou como protetor solar para a situação.

Na análise estatística e exploratória, a influência na mudança de orientação do cenário urbano foi pequena, entretanto os melhores resultados foram encontrados para a orientação leste. Com a redução do fator de visão de céu, a influência da orientação se tornou cada vez menos significativa nos resultados, tendo em vista a reduzida visão de céu, e conseqüentemente a redução nas horas de insolação direta.

Observa-se, também, que os resultados mais expressivos ocorreram para os céus em que há sol visível, pois grande parte da luz dentro dos ambientes para os melhores resultados era da componente de sol refletido. Os resultados para o céu encoberto foram positivos para o ambiente, mas pouco expressivos se comparados aos apresentados nas demais situações, mostrando que os benefícios oriundos da aplicação do elemento decorrem, em grande parte, da reflexão da luz do sol.

Vale ressaltar que a ocorrência de sol direto em alguns resultados pode não ter sido identificada em decorrência da malha utilizada. Como a dimensão da janela do modelo é pequena, e a posição em que o sol se encontra visível a partir do cânion é sempre com uma altura solar elevada, a faixa de luz solar direta no plano de trabalho é pequena, sempre mais estreita que a distância entre os pontos, fazendo com que ela nem sempre seja computada. Esse feito mostra que para elementos com frestas muito pequenas, ou ambientes com aberturas pequenas, a malha deve ser pensada para que tais efeitos não deixem de ser computados.

O cenário 3, que possui o menor fator de visão de céu, apresentou comportamento distinto dos demais, mas ainda assim conseguiu obter incrementos de iluminância e uniformidade, principalmente na posição de painel a 45°. O fato desse cenário ter tido comportamento diferenciado, e na análise de agrupamento ter configurado um grupo distinto, mostra a necessidade de se estudar melhor os cenários com visão de céu muito reduzida, menor que 20%.

Conclui-se que a redução do fator de visão de céu não apresentou uma relação direta com a aplicação do painel de corte a laser para os cenários estudados, entretanto as condições de entorno devem ser levadas em consideração na análise, principalmente em situações de cânions urbanos muito estreitos.

O presente trabalho conseguiu observar uma relação importante entre o efeito de redução da visão de céu, presente em diversas cidades em desenvolvimento, e a aplicação de um elemento avançado em iluminação natural. Essa conclusão acrescenta subsídios para a discussão quanto à regulamentação urbana e a adoção de parâmetros mais objetivos quanto ao

adensamento urbano, de forma a garantir a mínima disponibilidade de luz natural nos ambientes.

5.1 Limitações da Pesquisa e Sugestões de Trabalhos Futuros

Alguns aspectos podem ser destacados no sentido de identificar pontos do estudo que limitam a aplicabilidade dos resultados obtidos, são eles:

- O trabalho se limita a utilização de cenários urbanos em Maceió para a obtenção do fator de visão de céu, mas não aborda a discussão sobre a influência dos parâmetros urbanos da cidade na aplicabilidade do elemento.
- Os cenários com visão de céu menores que 20% apresentaram resultados distintos dos demais, apontando que as conclusões encontradas possam não se estender a tais situações.
- Foram analisadas apenas duas orientações de cânion urbano, limitando-se à análise da iluminância interna, sem computar os diferentes períodos de insolação de cada modelo.
- A utilização da simulação computacional apresenta-se como método preciso para a análise proposta, entretanto os algoritmos aplicam-se apenas a softwares que se utilizam do método do raio traçado.

Algumas propostas de trabalhos futuros podem ser apontadas tendo em vista as limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho:

- O método utilizado se mostrou capaz de chegar aos resultados esperados, entretanto a mesma metodologia pode ser inserida em um software que utilize o método da radiosidade com a finalidade de verificar a validade dos comportamentos encontrados.
- A análise dos períodos de insolação dentro do cânion urbano, e como isso afeta o desempenho do elemento.
- A análise de cânions urbanos profundos, com fator de visão de céu menor que 20%, e a verificação da viabilidade de se aplicar elementos avançados em iluminação natural em tais situações.

REFERÊNCIAS

- ALMANZA, R, CORREA, G. *Copper based thin films to improve glazing for energy-savings in buildings*. **Solar Energy**, v. 76, n. 1, p. 111-115. 2003.
- AL-MARWAEI, M.; CARTER, D. *Tubular Guidance Systems for Daylight: Achieved and Predicted Installation Performances*. **Applied Energy**, v. 83, n. 7, p. 744-788. 2006.
- ALVAREZ, G.; FLORES, J. J.; AGUILAR, J. O.; GÓMEZ-DAZA, O.; ESTRADA, C. A.; NAIR, M. T. S., NAIR, P. K. *Spectrally selective laminated glazing consisting of solar control and heat mirror coated glass: preparation, characterization and modelling of heat transfer*. **Solar Energy**, n. 78, p. 705-712. 2005.
- AMORIM, C. N. D. Iluminação natural e Eficiência Energética – Parte 1: Estratégias de projeto para uma arquitetura sustentável. **Paranoá**, v. 4, p. 95-111, 2002.
- ANDER, G. D. **Daylighting Performance and Design**. Estados Unidos: Editora Van Nostrand Reinhold, 1995
- ANDERSEN, M.; RUBIN, M.; SCARTEZZINI, J. *Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glass*. **Solar Energy**, n. 74, p. 157-173. 2004.
- ARAÚJO, I. A. L. ; CABÚS, R. C. Influência da Luz natural Refletida pelo Entorno na Iluminação de Edifícios em cânions Urbanos no Trópico Úmido. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais...**, p. 86-95, 2007.
- ARAÚJO, I. A. L.; CAVALCANTE, M. R. C.; CABÚS, R. C. Influência De Prateleira De Luz Sob Marquise Na Uniformidade Da Iluminação Natural Em Interiores. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...**, p. 83-91, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ISO/CIE 8995-1: **Iluminação de Ambientes de Trabalho**, Parte 1:Interior. Rio de Janeiro, 2013
- BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. 1. ed. Londres: James James, 2002.

BARBIRATO, G. M.; FERNANDES, E. F.; BARBOSA, R. V. R.; TELES, V. R.; OLIVEIRA, T. C. Análise do clima urbano de Maceió-AL comparações entre diversas escalas. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro. p. 628-634. 2000.

BARBOSA, G. B. **Arquitetura contemporânea em Maceió (1980-2008): uma reflexão crítica**. Maceió, 2009. 175p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado). Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. 2009

BARTENBACH, C. **Protection device against solar light**. US Patent Cl F24J 3/02 G02B 27/00 4,517,960. 1985.

BASTOS, O. M. K.; CABÚS, R. C. Análise da Influência da Orientação na Quantidade de Luz Natural Disponível Utilizando a Ferramenta Rosa de Luz. In: X Congresso de Engenharia, Ciência e Tecnologia, 2016, **Anais...**, p. 62-69, 2016.

BITTENCOURT, L. **Uso das cartas solares. Diretrizes para Arquitetos**. Maceió: Edufal, 2015

BOOMEL, W. V.; ROUHANA, A. **Theory of Light and Lighting**. 1. ed., Holanda: Philips, 2011.

BOUBEKRI, M. **Daylighting, Architecture and Health**. Burlington: Elsevier, 2008.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2001.

BURATTI, C.; MORETTI E. *Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems*, **Applied Energy**, n. 97, p. 430 - 437, 2011.

CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting: predicting sky types and interior illuminance in North-east Brazil**. 2002. 288p. Tese (Doutorado em Arquitetura) - *University of Sheffield. Sheffield, England*, 2002

CABÚS, R. C. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: Encontro Latino-Americano, 4., Encontro Nacional Sobre Conforto No Ambiente Construído, 8., 2005, Maceió, **Anais...** Porto Alegre: Antac, p. 240 - 249, 2005. 1 CD-ROM.

CÂNDIDO, C.; TORRES, S.; CABÚS, R. C. Análise Da Utilização De Prateleiras De Luz Em Edifício De Pesquisas Da Ufal, Maceió-Al. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...**, p. 280-288, 2005.

CHAPMAN L.; THORNES J.E.; BRADLEY A.V; *Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets*, **Theoretical and Applied Climatology**, n.69, p. 81-89, 2002. doi:10.1007/s007040170036

CHAVES, P. W. **Iluminação Natural em Escritórios: O Uso de Paineis Prismáticos em Aberturas Laterais**. 2012. 182p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Brasília. Brasília, 2012

CHEN, L. et al., *Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach*, **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 121-136, 2012.

CIAMPINI, F. **Sistemas inovadores de iluminação natural, estudo de seu desempenho sob condições de céu real em Campinas**. 2005. 314p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (CIE DS 011.2/E:2002). **Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky**. Vienna, 2002

CLARO, A. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural. Florianópolis**, 1998. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 1998.

CLARO, A.; PEREIRA, F. O. R.; LEDO, R. Z. *APOLUX – An Innovative Computer Code for Daylight Design and Analysis in Architecture and Urbanism*. In: *Ninth International IBPSA Conference - Building Simulation*, 2005, Montréal, **Anais...**, p. 199-206. 2005.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de Uma Arquitetura. Sustentável para os trópicos - Conforto Ambiental**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2010.

CORONA, E.; LEMOS, C. A. C. **Dicionário da arquitetura brasileira**. São Paulo: Edart, 1972.

CORREIA, A. G. U.; CABÚS, R. C.; ARAÚJO, V. M. D. Estudo comparativo da aplicação de softwares de iluminação no nordeste brasileiro. In: IX Luxamerica - Congresso Panamericano de Iluminación, 2008, Rosario. **Anais...**, 2008. v. 1. p. I-50-I-59.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Influência das tintas imobiliárias sobre o desempenho térmico e energético de edificações, In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2007, **Anais...**, p. 165-174. 2007

DWFCONFTRACT. Decorating with Fabric. <www.dwfcontract.com>. Acesso em 29 de abril de 2016.

EDMONDS, I.R, *Performing of Laser Cut Light Deflecting Panels in Daylighting Applications, Solar Energy Materials and Solar Cells*, n. 29, p. 1-26, 1993.

EDMONDS, Ian R. *Transparent Light Deflecting Panel for Daylighting Rooms*. Int CI⁵ G02B 17/00; G02B 27/00. 5 de fevereiro de 1991. *United States Patent. Patent Number:* 4,989,952.

EDMONDS. I.R.; GREENUP, P.J.; COMPAGNON, R, *Radiance Algorithm to Simulate laser-cut Panel Light-Redirecting Elements. Lighting Research and Technology*. n. 32, p. 49-54, 2000.

EDWARDS, B. **O Guia Básico Para Sustentabilidade**. Barcelona: Gustavo Gilli, 2008.

ESPACIO SOLAR. <<http://www.espaciosolar.com/>>. Acesso em 21 de Agosto de 2016

GLASSNER, A.S. *An Introduction to Ray Tracing*. San Diego: Academic Press. 1989

GREVE, B. *Reflections and Refractions in Ray Tracing*. Disponível em http://graphics.stanford.edu/courses/cs148-10-summer/docs/2006--degreve--reflection_refraction.pdf. Introduction to Computer Graphics and Imaging. Stanford University. 2006. Acesso em 21 de Julho de 2016.

GUTIERREZ, G. C. R.; LABAKI, L. C. Considerações sobre O Brise-Soleil Na Arquitetura Moderna Brasileira, Maceió-Al. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Maceió. **Anais...**, p. 874 – 88. 2005.

HAREDY, A. *Simulation of photovoltaic airflow windows for indoor thermal and visual comfort and electricity generation*. Nottingham, 2016. 295p. Tese (Doutorado em Arquitetura

e Clima Urbano). Departamento de Arquitetura e Clima Urbano, Universidade de Nottingham. 2016.

HEIM, D.; KIESZKOWSKI, K. *Shading devices designed to achieve the desired quality of internal daylight environment*. In: PLEA 2006, *the 23rd Conference on Passive and Low Energy*. 2006 **Anais...** . p. 269-274. Genebra. 2006.

HECHT, E. **Optics**. 4. ed. São Francisco: Pearson Educations as Addison Wesley. 2002.

HIGUERAS, E., **Urbanismo bioclimático**, Barcelona: Gustavo Gili, 2006.

HOLANDA, A. **Roteiro para construir no Nordeste**. Recife: UFPE, 1976.

HOPKINSON, R. G.; KAY, J. D. *The Lighting of Buildings*. London: Faber and Faber, 1972.

IEA - *International Energy Agency*. IEA SHC TASK 21 / ECBCS ANNEX29 *and Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL-44296: Daylighting Simulation: Methods, Algorithms, and Resources*. Berlin, 1999.

IEA - *International Energy Agency*. IEA SHCP TASK 21 / ECBCS ANNEX29: *Measurement of Luminous Characteristics of Daylighting Materials*. Berlin, 1999.

IEA, *International Energy Agency*. *Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems*. Washington: IEA, 2000.

IKEDA, D. F. R. **Análise De Projeto Com Foco em Iluminação Natural: Aprimoramento E Validação De Um Método**, 2012, 194p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Brasília. Brasília, 2012.

INTERIOR DESIGN. <cedesrivera.blogspot.com>. Acesso em 05 de abril de 2016.

IZARD, J.; GUYOT, A. *Arquitectura Bioclimática*. Mexico: Gustavo Gili, 1983.

JAMES, P.A.B.; BAHAJ, A.S, *Holographic optical elements: various principles for solar control of conservatories and sunrooms*, **Solar Energy**, n. 78, p. 441–454, 2005.

KALOS, M. H. e P. A. WHITLOCK. **Monte Carlo methods**, v.1, 1986

KAZANASMAZ, T.; ORS, P. F. *Comparison of Advanced Daylighting Systems to Improve Illuminance and Uniformity through Simulation Modelling*, **Light and Engineering**, n.22, p. 56-66, 2013.

KIM, J.; Tai; KIM, G. *Overview and new developments in optical daylighting systems for building healthy indoor environment*, **Building and Environment**, n. 45, p. 256–269, 2010.

KOENIGSBERGER, O; INGERSOLL, T.G.; MAYHEW, A; SZOKOLAY, S. V.; **Viviendas y Edificios en Zonas Calidas y Tropicales**. Madrid: Paraninfo, 1977.

KOSTER H. *Dinamic daylight Architecture, basics systems projects*. Birkhauser: Basel, 2004.

KOSTER H. *Sun protection Installation comprising sun protection lamellae having a toothed upper side*. Int cl G02B 27/00 us patent US 006367937 b2 9 abril 2002.

KOSTER, H.; KARL-BIEBER. *Toothed daylight blinds*. PCT WO 01/00958 4 janeiro 2001.

KREITH, F.; BOHN, M. S.; **Princípios de transferência de calor**. 6 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KWOK, C. M.; CHUNG, T. M, *Computer simulation study of a horizontal light pipe integrated with laser cut panels in a dense urban environment*. **Lighting Research and Technology**, v.40, p. 287–305, 2008.

LAAR, M. *Daylighting Systems For The Tropics The Example Of Laser Cut Panels (Austrália) And Plexiglas Daylight (Germany)*. In: *International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, 2001. **Resumos...**, p. 1329-1334, Building Simulation, 2001.

LABIB, R. *Improving Daylighting in Existing Classrooms Using Laser Cut Panels*, **Lighting Research and Technology**, n. 45, p. 585-598, 2012.

LAM, W. *Perception and Lighting as formgivers for architecture*. Nova York: McGraw-Hill, 1977.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. Ed. Rio de Janeiro: PW Editores. 2014.

LAOUADI, A; SABER, H.H; GALASIU, A. D; ARSENAULT, C. *Optical model for prismatic glazing (1415-RP)*. **HVAC&R Research**, n. 19, p. 63–75, 2012

LARANJA, A. C. **Parâmetros urbanos e a disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno**. Rio de Janeiro, 2010. 242p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.

LARANJA, A. C.; CABÚS, R. C.; ALVAREZ, C. E.; CORREIA, L. G, Análise das relações entre a geometria urbana e a orientação das aberturas na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo (PUCMG)**, v. 20, p. 151-167, 2013.

LARANJA, A. C.; GAZZANEO, L. M. C.; CABÚS, R. C., Interferências Da Largura Das Vias Na Disponibilidade De Iluminação Natural Do Ambiente Interno. **Labor & Engenho (Centro de Memória Unicamp)**, v. 3, p. 10-19, 2009.

LEDER, S. M.; PEREIRA, F. O. R., Ocupação Urbana e Disponibilidade de Luz Natural. **Revista Minerva**, v. 5, p. 129-138, 2008.

LESLIE, R. P. L. *Capturing the Daylight Dividend in Buildings: Why and How?*, **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 381-385. 2003.

LI, D. H. W.; Ernest, K.W. T. *An analysis of daylighting performance for office buildings in Hong Kong*. **Building and Environment**, v. 43, n. 2, p. 1446-1458. 2007

LIMA, R. C. **Interferência do entorno construído na disponibilidade de luz natural no interior do ambiente no litoral norte de Maceió** - al. Maceió, 2015. 147p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço habitado da Universidade Federal de Alagoas. 2015

LITTLEFAIR, P., *Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city*. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Londres, n. 2, p. 303-326, 1998.

LOPES, J. M. B. **Radiosidade**. 2009. 25p. Monografia (Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2009.

LORENZ W. *A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation*. **Solar Energy**, v. 70, p. 109-130, 2001.

LORENZ, W. *Design guidelines for a glazing with a seasonally dependent solar transmittance*. **Solar Energy**, n.63, p. 79-96, 1998.

LORRAIN, P.; CORSON, D.; LORRAIN, F. **Campos e Ondas Eletromagnéticas**. Lisboa: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.

LOWRY, G.; THOMAS, S. *Spreadsheet-based calculation tool for direct daylight illuminance adaptable for different glazing properties and sky models*. **Building and Environment**, n. 45, p.1081-1086, 2010.

LUKIANCHUKI, M. A.; CARAM, R. M.. Análise do conforto térmico na obra de João Figueiras Lima, Lelé: Hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro. In: XII ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2013, **Anais...**, p. 33-43, Brasília – DF. 2013

MACEIÓ, Lei Municipal Nº 5.593, de 08 de fevereiro de 2007. Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. **Diário Oficial de Maceió**, 2007

MAHNKE, F. H. **Color, Environment, and Human Response**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1996.

MANHAS, M. P. G. **Difusa ou especular? Estudando o desempenho da prateleira de luz segundo a refletância de sua superfície**. Maceió, 2016. 212p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas do Espaço habitado da Universidade Federal de Alagoas. 2016

MASCARÓ, L. E. A. R. A Influência da Morfologia dos Recintos Urbanos na Iluminação Natural. In: IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1997, Salvador. **Anais...**, p. 299-304, Salvador: AUFBA LACAM ANTAC, 1997.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MINELLA, F. O.; ROSSI, F. A.; KRUGER, E. L. Influência do Fator de Visão de Céu no Conforto Térmico em duas Situações Urbanas Distintas. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...**, p. 208-217, 2009.

MITALAS, G. P.; ARSENEAULT, J. G. *Division of Building Research Computer Program No. 28: Fortran IV program to calculate absorption and transmission of thermal radiation by single and double glazed windows*. National Research Council, Ottawa, 1968

MOORE, F. *Concepts and Practice of Architectural Daylighting*. South Melbourne: Van Nostrand Reinhold, v. 1, 1991.

NETTO, A. R. A. **Melhoria no Desempenho Lumínico e Energético de Edifícios com Prateleiras de Luz**. 2015. 151p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2015.

OAKLEY, G.; RIFFAT, S. B.; SHAO, L. *Daylight performance of light pipes*. **Solar Energy**, n. 69, p.89-98. 2000.

OH, S. J.; CHUN, W.; RIFFAT, S.; RIFFAT, B.; JEON, Y. I.; DUTTON, S.; HAN, H. J. *Computational analysis on the enhancement of daylight penetration into dimly lit spaces: Light tube vs. fiber optic dish concentrator*. **Building and Environment**, nº59, p. 261-274, 2013.

OKALUX. **Catalogo de especificações Técnicas de produtos**. 2002.

OKE, T.R. *Boundary Layer Climates*. 2. ed. Londres: Routledge. 1987. ISBN 0-415-04319-0.

OKE, T.R. *Canyon Geometry and the Nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations*, **Journal of Climatology**, New York, v.1, n. 3. p. 237-254. 1981.

OLIVEIRA, L.P.; ROMERO, M.B.; Reflexões sobre a relação W/H. Considerações sobre a altura, espaçamento e profundidade das edificações na malha urbana e suas consequências. In: ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais...**, p. 358-366, 2007.

PARK, D.; KIM, P.; ALVARENGA, J.; JIN, K.; AIZENBERG, J.; BECHTHOLD, M. *Dynamic daylight control system implementing thin cast arrays of polydimethylsiloxane-based millimeter-scale transparent louvers*. **Building and Environment**, n. 82, p. 87-96, 2014.

PASSOS, I. C. S. ; LAMENHA, M. A. ; CABÚS, R. C. Análise comparativa entre desempenho luminoso e eficiência energética utilizando o Troplux. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014, p. 53-62. **Anais...**, 2014.

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. *All-Weather model for sky luminance distribution*. **Solar Energy**. V. 50, n. 3, p. 235-245, 1993.

PHILLIPS, D. ***Lighting Modern Buildings***. Oxford: Architectural Press, 2000.

PHILLIPS, D. ***Natural Light in Architecture***. Burlington: Architectural Press as Elsevier, 227 p. 2004.

RAMOS, G.; GHISI, E. *Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1948–1958, 2010.

RANDL, C. *Repair and Reproduction of Prismatic Glass Transoms*. **Preservation Tech Notes**. n. 1, p. 1-6, Washington, 2001.

REVISTA METROPOLISMAG. <<http://www.metropolismag.com/March-2007/Let-There-Be-Light>>. Acesso em 21 de setembro de 2016.

RIBEIRO, P. V. S. Estudo da Aplicação de Painéis Prismáticos Tipo Laser Cut para Captação de Luz Natural em Edificações nos Trópicos. 2014. 141p. Plano de Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SANTOS, S. D. P. **Sistemas Avançados de Iluminação Natural: Estudo Comparativo de Vidros Prismáticos, Laser-Cut, Panels e Channel Panels**. 2009. 142p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009.

SCHULTZ , J.M; JENSEN, K.I.; KRISTIANSEN, F;H. *Super insulating aerogel glazing*. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, n. 89, p. 275–285, 2005.

SIEGEL, R; HOWELL, J. R. ***Thermal Radiation Heat Transfer***. Nova York: McGraw Hill. 1972.

SITECO. ***Daylight systems for glare-free light and pleasant room atmospheres***. Catálogo de Produtos, Osram: Berlim. 2012.

SMITH, G. B.; DLIGATCH, R.; SULLIVAN, R.; HUTCINS, M. G. *Thin Film Angular Selective Glazing*. **Solar Energy**, v. 62, n.º 3, p. 229–244, 1998.

SMITH, G. B.; GREEN, D. C.; MCCREDIE, G.; HOSSAIN, M.; SWIFT, P. D.; LUTHER, M. B. *Optical characterization of materials and systems for daylight*. **Renewable energy**, n. 22, p. 85-90, 2001.

SOLARTRAN Pty Ltd. <www.solartran.com.au>. Acesso em 05 de abril de 2016.

SOTO S. F. J. **Avaliação do Desempenho Luminoso de Duto de Luz: Estudo da Implementação em Ambientes Padrões de Habitações Populares em Três Latitudes**. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

STAMNES, J. J. **Physical Optics, Lecture Notes**. 2^a ed. Department of Physics, University of Bergen. 2004

SUGA, M. **Avaliação Do Potencial De Aproveitamento De Luz Natural Em Cânions Urbanos: Estudo Realizado Nos Eixos Estruturais De Curitiba**. 2005. 213 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do paraná Curitiba, 2005.

TOLEDO, G. E.; PELEGRINI, A. V.. Simulação computacional aplicada na avaliação do percentual de aproveitamento de luz natural gerada por um duto de luz solar. **Cadernos Proarq**, v. 20, p. 166-182, 2013.

TREGENZA, P.; I. M. WATERS. *Daylight coefficients*. **Lighting Research & Technology**, v.15, n.2, p.65-71, 1993.

TREGENZA, P. SHARPLES, S. **Daylighting Algorithms**. *School of Architecture Studies – Un. Sheffield*, 1993.

TREGENZA, P., *The Monte Carlo method in lighting calculations*. **Lighting Research & Technology**, n. 15(4), p. 163-170, 1983.

TREGENZA, P., *Uncertainty in daylight calculations*. **Lighting Research & Technology**, n. 81, p. 1 – 16, 2016.

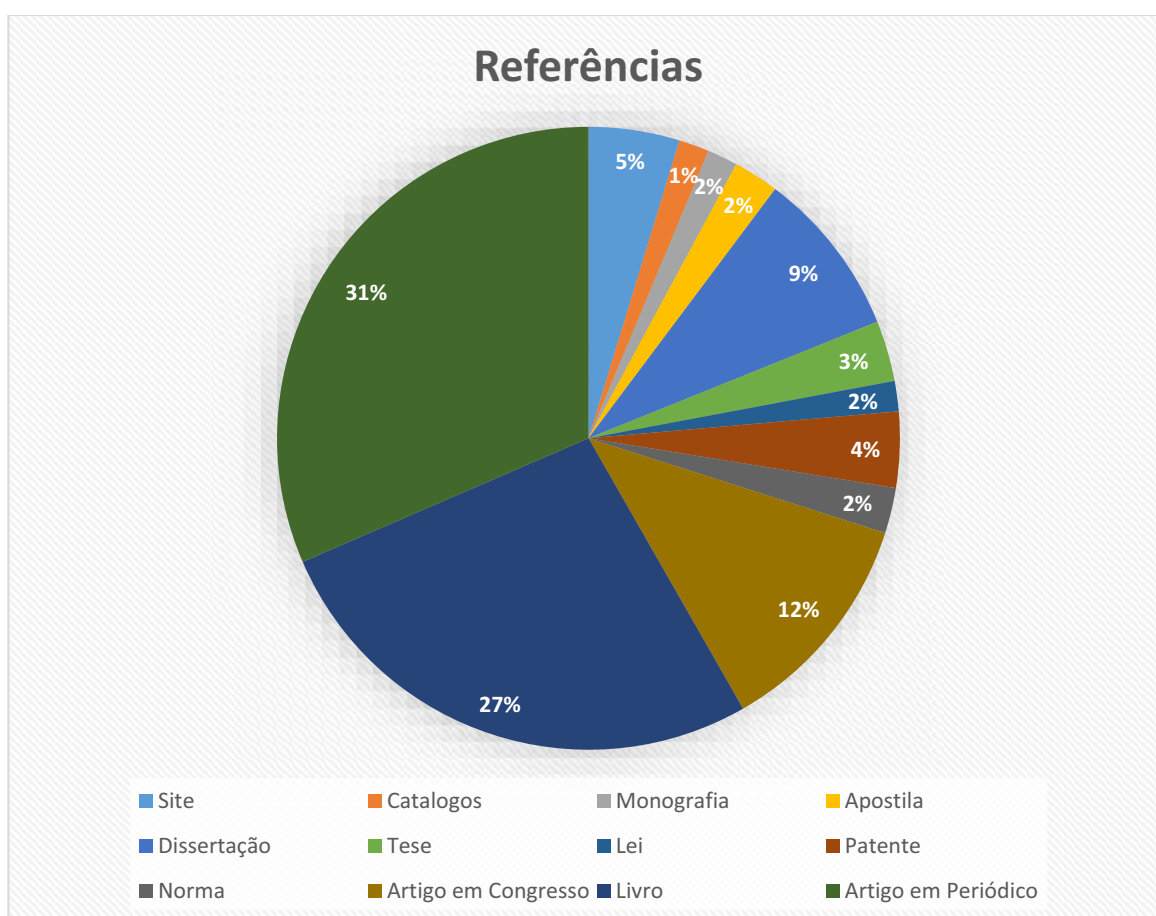
TREGENZA, P.; WILSON, M. **Daylighting: Architecture and Lighting Design**. Oxford: Routledge, 2011.

WALKER, J. **Fundamentos da Física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2009.

WATT, A. **3D Computer graphics**. 3. ed. Essex: Addison-Wesley. 2000

WELFORD W.T., WINSTON R. **High Collection Non imaging Optics**, San Diego: Academic Press, 1989.

ZIGER PROJECTS. < <http://www.zigersnead.com/> >. Acesso em 02 de Dezembro de 2016.



APÊNDICE A – Algoritmo da Função ‘Fprismtr.M’

```

function [aDirTr]=fPrismTr(aWinPatMat,aXYZPla,aPhot,cRoom)
%Calcula os Cossenos Diretores do raio Transmitido e Refratado
% Base teórica: HETCH, 2000
% Pedro 2016.02.05

%Condicional Inicial, verifica os valores de n
if aWinPatMat(3)==4
    nN1=1.0;
    nN2=1.5;
else
    nN1=1.5;
    nN2=1.0;
end

nPl=aXYZPla(4); % Número do Plano
aNewPhot=fHit(aPhot,aXYZPla); % Grava Interseção
aCosRay=aNewPhot(1:3); % Cossenos diretores do Raio
aCosNor=cRoom{2}(nPl,1:3); % Cossenos Diretores da normal do plano
nCosT=abs(aCosRay*-aCosNor); % Ângulo de Incidência - Radianos

%Testa a Reflexão total interna
if nN2/nN1>((1-nCosT^2)^(0.5)) % tudo Ok!
    aDirTr=(nN1/nN2)*aCosRay+((nN1/nN2)*nCosT-(1-((nN1/nN2)^2)*(1-
nCosT^2))^(1/2))*aCosNor;
else %Reflexão total interna
    aDirTr=[0 0 0];
end

```

APÊNDICE B – Algoritmo da Função ‘Fprismref.M’

```
function [aDirRef]=fPrismRef(aXYZPla,aPhot,cRoom)
%Calcula os Cossenos Diretores do raio Refletido
% Base teórica: HETCH, 2000
% Pedro 2016.02.05

nPl=aXYZPla(4); % Número do Plano
aNewPhot=fHit(aPhot,aXYZPla); % Grava Interseção
aCosRay=aNewPhot(1:3); % Cossenos diretores do Raio
aCosNor=cRoom{2}(nPl,1:3); % Cossenos Diretores da normal do plano
nCosT=aCosRay*aCosNor'; % Ângulo de Incidência - Radianos

aDirRef=aCosRay-2*(nCosT)*aCosNor;
```

APÊNDICE C – Algoritmo da Função ‘fPrismreftr.M’

```

function [nRef nTr]=fPrismRefTr(aWinPatMat,aXYZPla,aPhot,cRoom)
%Calcula a refletância e a Transmitância direcional para o novo material
% Base teórica: HETCH, 2000
% Pedro 2016.02.05
% 2016.02.16 - Otimização dos cálculos - PEDRO

%Condicional Inicial, verifica os valores de n
if aWinPatMat(3)==4
    nN1=1.0;
    nN2=1.5;
else
    nN1=1.5;
    nN2=1.0;
end

nPl=aXYZPla(4); % Número do Plano
aNewPhot=fHit(aPhot,aXYZPla); % Grava Interseção
aCosRay=aNewPhot(1:3); % Cossenos diretores do Raio
aCosNor=cRoom{2}(nPl,1:3); % Cossenos Diretores da normal do plano
nCosT=aCosRay*-aCosNor'; % Cosseno do Ângulo de Incidência

%Testa a Reflexão total interna
if nN2/nN1>((1-nCosT^2)^(0.5)) % tudo Ok!
    nRPerp=(nN1*nCosT-nN2*sqrt(1-((nN1/nN2)*((1-
nCosT^2)^(0.5)))^2))/(nN1*nCosT+nN2*sqrt(1-((nN1/nN2)*((1-nCosT^2)^(0.5)))^2));
    nRPara=(-nN2*nCosT+nN1*sqrt(1-((nN1/nN2)*((1-
nCosT^2)^(0.5)))^2))/(nN2*nCosT+nN1*sqrt(1-((nN1/nN2)*((1-nCosT^2)^(0.5)))^2));
    nRef=((nRPerp^2)+(nRPara^2))/2;
    nTr=1-nRef;
else %Refexão total interna
    nRef=1; nTr=0;
end

```

APÊNDICE D – Conjunto de Dados Utilizados

Ângulo	SVF	Céu	Orientação	E Med.	E Max.	E Min.	Uniformidade	Grupo
0	19	1	180	38,5	79,6	19,7	51,1	1
15	19	1	180	82,6	176,3	27,1	32,8	1
30	19	1	180	111,1	303,6	58	52,2	1
45	19	1	180	111,8	277	45,5	40,7	1
0	31	1	180	32,5	59,9	15,6	48	1
15	31	1	180	59,2	141,1	18,3	30,9	1
30	31	1	180	78,6	272,5	39,8	50,6	1
45	31	1	180	97,8	280,8	25,1	25,7	1
0	43,4	1	180	14,5	32,3	6,2	42,8	1
15	43,4	1	180	16,6	36,8	6,7	40,5	1
30	43,4	1	180	20,2	60,3	7,9	39,2	1
45	43,4	1	180	14,6	32,3	6,2	42,5	1
0	19	1	270	38,5	79,6	19,7	51,1	1
15	19	1	270	82,6	176,3	27,1	32,8	1
30	19	1	270	111,1	303,6	58	52,2	1
45	19	1	270	111,8	277	45,5	40,7	1
0	31	1	270	32,5	59,9	15,6	48	1
15	31	1	270	59,2	141,1	18,3	30,9	1
30	31	1	270	78,6	272,5	39,8	50,6	1
45	31	1	270	97,8	280,8	25,1	25,7	1
0	43,4	1	270	14,5	32,3	6,2	42,8	1
15	43,4	1	270	16,6	36,8	6,7	40,5	1
30	43,4	1	270	20,2	60,3	7,9	39,2	1
45	43,4	1	270	14,6	32,3	6,2	42,5	1
0	19	10	180	128,9	282,5	61,2	47,5	2
15	19	10	180	283,2	570	101	35,7	3
30	19	10	180	499,3	1939	197,8	39,6	5
45	19	10	180	434	988,9	187,3	43,2	4
0	31	10	180	117,7	223,6	54,5	46,3	2
15	31	10	180	317,3	822,3	65,3	20,6	3
30	31	10	180	355,7	1219,4	166,5	46,8	5
45	31	10	180	390,7	1074,2	98,3	25,2	3
0	43,4	10	180	60	172,5	24,2	40,4	1
15	43,4	10	180	57,9	109,8	26,6	45,9	1
30	43,4	10	180	81,8	253	30	36,7	1
45	43,4	10	180	60,3	174,3	24	39,8	1
0	19	10	270	141,3	295,3	73,5	52	2
15	19	10	270	304,8	707,4	103,2	33,9	3
30	19	10	270	387,2	810,1	238,1	61,5	4
45	19	10	270	409,4	897,5	175,7	42,9	4
0	31	10	270	117,2	212,6	56,5	48,2	2
15	31	10	270	203,7	531,2	67,5	33,1	3

30	31	10	270	250	606,7	156,7	62,7	4
45	31	10	270	353,6	961,4	94,6	26,8	3
0	43,4	10	270	50,5	110,1	21,2	42	1
15	43,4	10	270	89,2	399,9	23,8	26,7	1
30	43,4	10	270	70,8	237,1	29,1	41,1	1
45	43,4	10	270	50,8	110,1	21,3	41,9	1
0	19	14	180	125,5	289,7	55,9	44,6	2
15	19	14	180	277,8	523,7	82,8	29,8	3
30	19	14	180	579,5	2970,4	166,4	28,7	5
45	19	14	180	485,4	1072,3	216	44,5	4
0	31	14	180	126,9	251,5	58,1	45,8	2
15	31	14	180	421	1254,4	70,2	16,7	3
30	31	14	180	431,7	1475,9	193,9	44,9	5
45	31	14	180	451,1	1290	112,4	24,9	3
0	43,4	14	180	72,4	254,2	27,9	38,5	1
15	43,4	14	180	62,9	109,9	30,4	48,3	1
30	43,4	14	180	94,8	296,4	33,6	35,4	1
45	43,4	14	180	72,8	257,7	27,3	37,5	1
0	19	14	270	148,5	316,4	77,6	52,3	2
15	19	14	270	327	795,7	113	34,6	3
30	19	14	270	407,8	740,6	278,6	68,3	4
45	19	14	270	448,6	909,5	199,9	44,6	4
0	31	14	270	124,8	230	60,5	48,5	2
15	31	14	270	211,3	706,9	73,4	34,7	3
30	31	14	270	254,8	444,2	181,9	71,4	4
45	31	14	270	384,1	1101,3	105,8	27,5	3
0	43,4	14	270	53,6	115,7	21,1	41,1	1
15	43,4	14	270	114,9	595	25,6	22,3	1
30	43,4	14	270	76,4	311,1	31,6	41,4	1
45	43,4	14	270	53,9	113	22,5	41,7	1
0	19	16	180	104,4	228,1	50	47,9	2
15	19	16	180	220,8	443,6	80,9	36,6	3
30	19	16	180	368,7	1376,6	151,1	41	5
45	19	16	180	329,2	781,2	143,5	43,6	4
0	31	16	180	95,6	181,1	44,8	46,9	2
15	31	16	180	235,3	595,1	51,8	22	3
30	31	16	180	255,4	815,8	124,6	48,8	4
45	31	16	180	437	1274,6	106,8	24,4	3
0	43,4	16	180	49,5	132,6	20,2	40,8	1
15	43,4	16	180	47,6	90,4	21,9	46,1	1
30	43,4	16	180	65,2	194,3	24,5	37,6	1
45	43,4	16	180	49,8	133,9	20	40,2	1
0	19	16	270	114,9	240,1	59,6	51,9	2
15	19	16	270	257	587,4	86,4	33,6	3
30	19	16	270	332,9	669,3	204,8	61,5	4

45	19	16	270	347,6	784,1	150,2	43,2	4
0	31	16	270	94,7	171,5	45,6	48,2	2
15	31	16	270	165,9	422,4	54,9	33,1	3
30	31	16	270	212,4	514,5	135,6	63,8	4
45	31	16	270	356,2	972,7	98,3	27,6	3
0	43,4	16	270	39,7	85,8	16,7	42,1	1
15	43,4	16	270	70,8	314	19	26,8	1
30	43,4	16	270	54,4	155,5	23,5	43,2	1
45	43,4	16	270	39,9	85,6	16,8	42,1	1

ANEXO A – Conceitos Utilizados: Princípios Ópticos nos Dispositivos Avançados de Iluminação Natural

Para que as ferramentas teóricas aplicadas à predição da iluminância no ambiente construído tenham efeito é importante que o modelo seja o mais próximo possível da realidade, e que as características e o comportamento físico do modelo sejam definidos de forma a se assemelhar, tanto quanto possível, à realidade.

Refletância e Transmitância

Duas características definem o comportamento óptico dos materiais, a refletância e a transmitância, nas formas especular e difusa. Além delas soma-se a componente absorvida pelo material. Quando a radiação incide sobre uma superfície uma porção é absorvida pelo material, uma é refletida e o restante é transmitido através do corpo de forma que a energia de cada parcela somada resulta na inicial (KREITH e BOHN, 2003).

Outro fenômeno observado nos meios em que a luz incide é a refração. A mudança no ângulo do raio de luz, ao passar de um meio para outro, acontece devido a diferente velocidade de propagação da luz nos materiais. Esse fenômeno pode ser observado facilmente no vidro ou na água. Essa característica, dependendo do ângulo de incidência do raio luminoso e da forma do elemento, pode causar o efeito de dispersão cromática, que é a divisão do raio original em comprimentos de onda diferentes, no espectro de cor visível. (WALKER, 2009).

A lei de Snell

O efeito de mudança na direção do raio luminoso ao atravessar uma interface entre dois meios é definido pela lei de Snell. A refração define-se quando um raio luminoso atinge a interface entre dois meios não dielétricos: ele tende a mudar de velocidade, e com isso se afastar ou se aproximar da normal, dependendo do índice de refração dos materiais (Figura 69). Após incidir no meio, a onda eletromagnética poderá refletir na superfície, ser transmitida pelo meio ou ser absorvida, ou a combinação de efeitos (STAMNES, 2004).

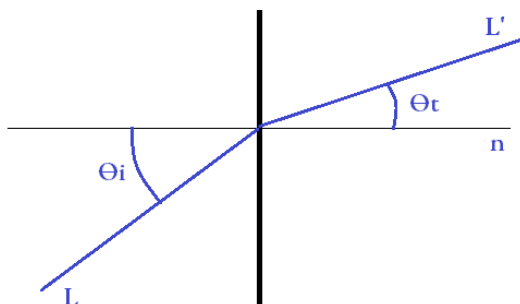


Figura 69 - Efeito da refração entre dois meios

A relação entre o ângulo de incidência (Θ_i) e o ângulo de transmissão do raio após a interface (Θ_t) é dada pela lei de Snell (GLASSNER, 1989).

$$\sin \Theta_t = \frac{n_1}{n_2} \times \sin \Theta_i \quad [\text{Eq. 15}]$$

em que n_1 indica o índice de refração do meio 1 e n_2 o índice de refração do meio 2.

Para índices de refração dos meios iguais, o raio de luz não sofre mudança na sua trajetória, mas a medida em que essa diferença aumenta o raio tende a se aproximar do vetor normal do plano de incidência. Na Figura 70 é possível observar que, com o aumento do índice de refração do segundo meio, há uma redução gradual do ângulo de refração se comparado à situação anterior, aproximando-se do vetor normal do plano de incidência.

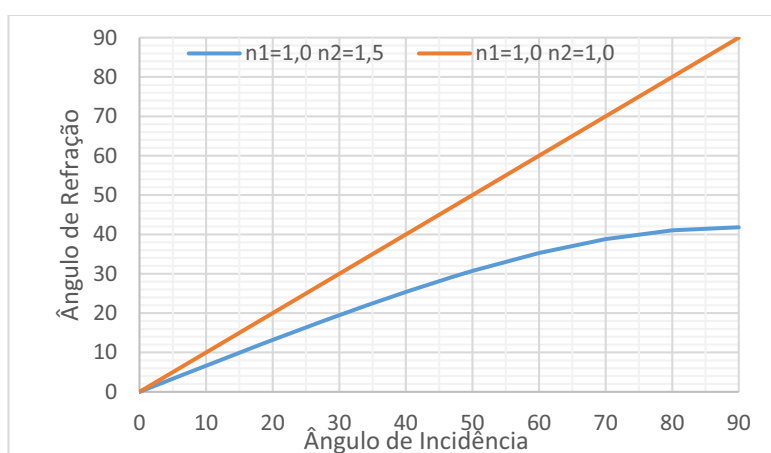


Figura 70 - Relação entre ângulo de incidência e de refração para índices de refração iguais e diferentes

Reflexão total interna

Em uma situação onde o índice de refração do meio originário do raio é maior que o meio em que ele deve atravessar observa-se, como anteriormente, uma mudança no ângulo do raio luminoso, como apresentado na Figura 71, sendo que o raio agora tende a se afastar da normal

do plano de interface. Existe um ângulo de incidência em que o ângulo de transmissão passa de 90°, resultando no efeito denominado de reflexão total interna (LORRAIN *et al.*, 1998).

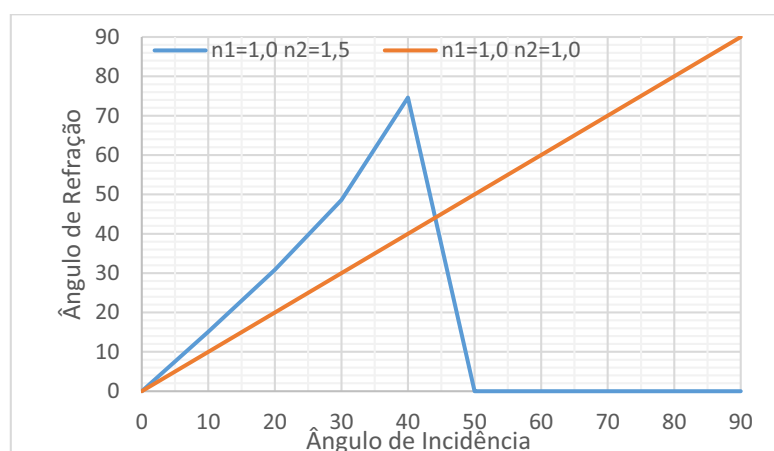


Figura 71 - Relação entre ângulo de incidência e de refração para índices de refração iguais e diferentes

Para o exemplo apresentado na Figura 71 o ângulo crítico é de 43°, a partir desse ângulo de incidência não haverá efeito de transmissão do raio luminoso, mas toda a energia será refletida. Importante apontar que como o local onde o efeito acontece é a interface entre dois planos, e que a sua espessura é desprezível, o efeito de absorção é desprezível, mas unicamente de reflexão integral do raio luminoso incidente (HECHT, 2002). Esse efeito é muito importante pois será a base do funcionamento do PCL dentre outros elementos como a fibra óptica.

Os coeficientes de Fresnel

Em uma incidência normal ao plano a transmissão do raio luminoso é total, mas ao passo que esse ângulo aumenta há um decréscimo na componente transmitida e um aumento na componente refletida. Algumas formulações da ondulatória permitem calcular a refletância para as duas polaridades de onda luminosa, essas leis determinam a fração refletida e a fração transmitida, e são denominadas de coeficientes de Fresnel (HECHT, 2002). Para tanto temos que,

$$r_{perpendicular} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad [\text{Eq. 16}]$$

$$r_{paralelo} = \frac{n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad [\text{Eq. 17}]$$

As duas polarizações da onda luminosa podem ser melhor entendidas na Figura 72, nas quais as formulações previamente apresentadas se baseiam.

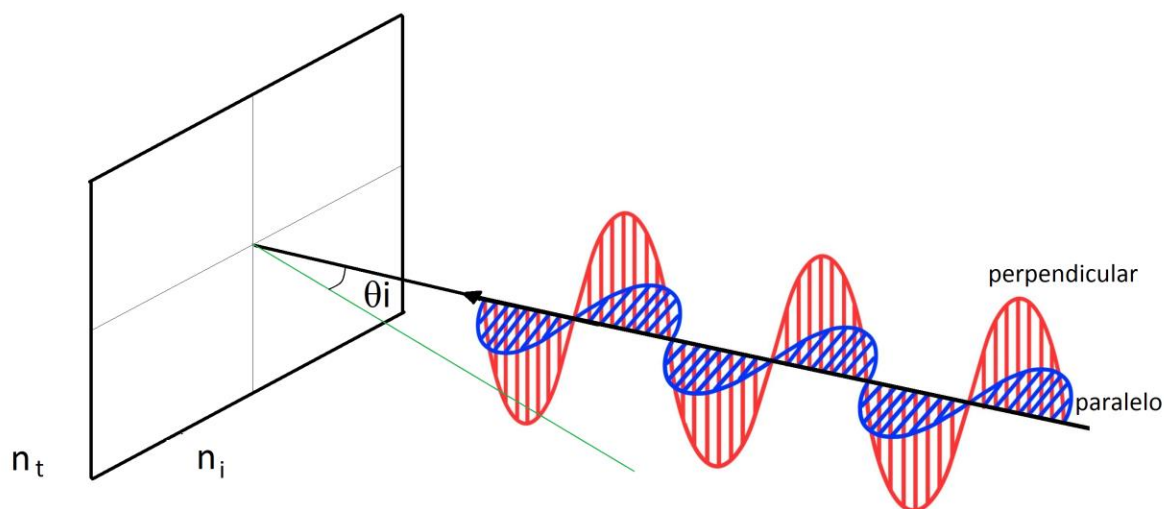


Figura 72 - Polarização da onda luminosa incidente em um plano

Segundo Stamnes (2004), a luz natural pode ser tratada como uma luz não polarizada, tendo em vista a variabilidade constante de sua polarização, para tanto segue que,

$$R = \frac{r_{perpendicular}^2 + r_{paralelo}^2}{2} \quad [\text{Eq. 18}]$$

$$T = 1 - R \quad [\text{Eq. 19}]$$

Em que R é a refletância da interface entre os meios para o ângulo de incidência dado, e pelo fato de na reflexão em interfaces não haver absorção da luz, a transmitância é o que resta para completar 100% da energia luminosa do raio. A Figura 73 apresenta o comportamento dos raios de luz que incidem sobre a interface de dois meios com índices de refração diferentes. É possível perceber que quando o raio luminoso passa para um meio com maior índice de refração a transmitância normal ao plano é alta e tende a decrescer com o aumento do ângulo de incidência, seguindo a refletância o sentido contrário. Já quando o raio passa para um meio de menor índice de refração a redução da transmitância chega ao máximo em um ângulo de incidência menor que 90° , indicando que raios incidentes a partir desse ângulo serão totalmente refletidos, efeito chamado de reflexão total interna.

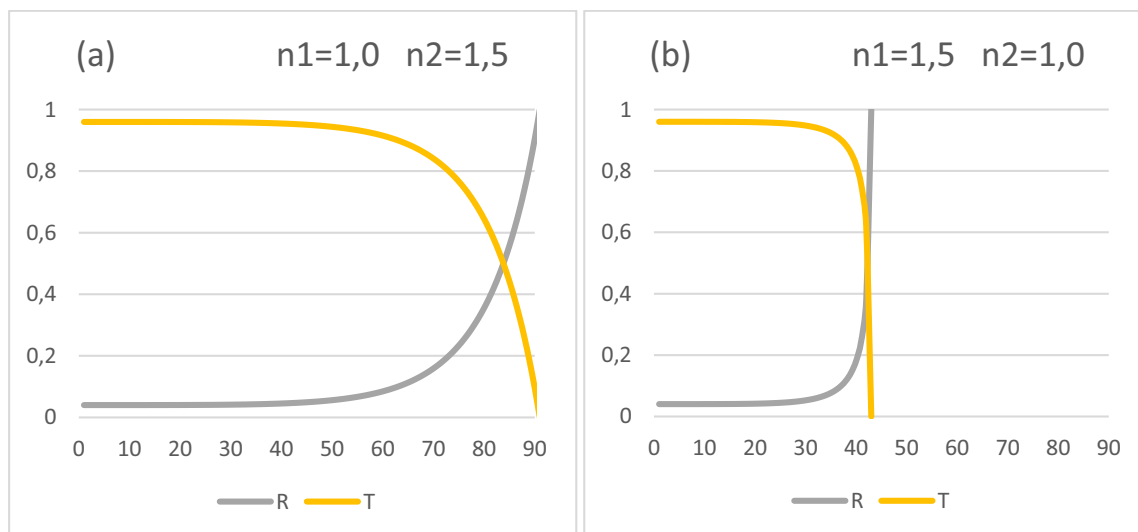


Figura 73 - Índices de Reflexão e transmissão para meios com índice de refração diferentes, para raios vindos na direção de 1 para 2 (a) e no sentido inverso (b).

ANEXO B – Escolha da Formulação Utilizada

A utilização de softwares de simulação em iluminação natural é uma opção para a avaliação do desempenho de um dispositivo avançado em iluminação, entretanto o programa deverá possuir em sua formulação base os requisitos para trabalhar com eventos ópticos como o da reflexão total interna. Comumente esses programas utilizam equações simplificadas para tratar dos efeitos de reflexão e transmissão, e os efeitos de refração dos raios luminosos normalmente não são devidamente computados, tendo em vista a sua pouca influência no desempenho luminoso de ambientes com vidro comum. Tregenza e Sharples (1993) a [Eq. 20] uma formulação para a transmitância direcional em vidros transparentes de faces paralelas, o vidro comum, que é amplamente utilizada pelos softwares de simulação em iluminação natural inclusive o TropLux. A formula é dada por,

$$t_i = -0,028378 + 3,156075 \cos i - 3,058376 \cos^2 i - 1,428919 \cos^3 i + 4,014235 \cos^4 i - 1,775827 \cos^5 i \quad (14)$$

Onde:

t_i - Transmitância direcional.

i - ângulo de incidência do raio luminoso com relação à normal do plano

Edmonds (2000) desenvolveu um algoritmo que permite simular o PCL no software Radiance, utilizando o módulo de elementos prismáticos que o software disponibiliza. Para tanto foi necessário que o autor descrevesse fisicamente o comportamento dos raios luminosos dentro do material. O primeiro passo foi calcular refletância direcional, para tanto ele propõe a seguinte formulação:

$$\cos_i = \text{abs}(\dot{R}) \quad [\text{Eq. 21}]$$

$$rte = \frac{\cos_i - \sqrt{A^2 - 1 + \cos_i^2}}{\cos_i + \sqrt{A^2 - 1 + \cos_i^2}} \quad [\text{Eq. 22}]$$

$$rtm = \frac{A^2 * \cos_i - \sqrt{A^2 - 1 + \cos_i^2}}{A^2 * \cos_i + \sqrt{A^2 - 1 + \cos_i^2}} \quad [\text{Eq. 23}]$$

$$R = \frac{rte^2 + rtm^2}{2} \quad [\text{Eq. 24}]$$

$$T = 1 - R$$

Onde:

\hat{R} - Cosseno entre o raio e a normal da superfície

rte – Refletância na polaridade paralela

rtm – Refletância na polaridade perpendicular

A_2 - Índice de refração do meio

R - Refletância direcional do raio incidente

T - Transmitância direcional do raio incidente.

Se comparados os resultados obtidos através da fórmula apresentada por Tregenza e Sharples (1993) com a dos coeficientes de Fresnel apresentados no Anexo A, com a de Edmonds (2000) é possível verificar uma diferença, como apresentado na Figura 74.

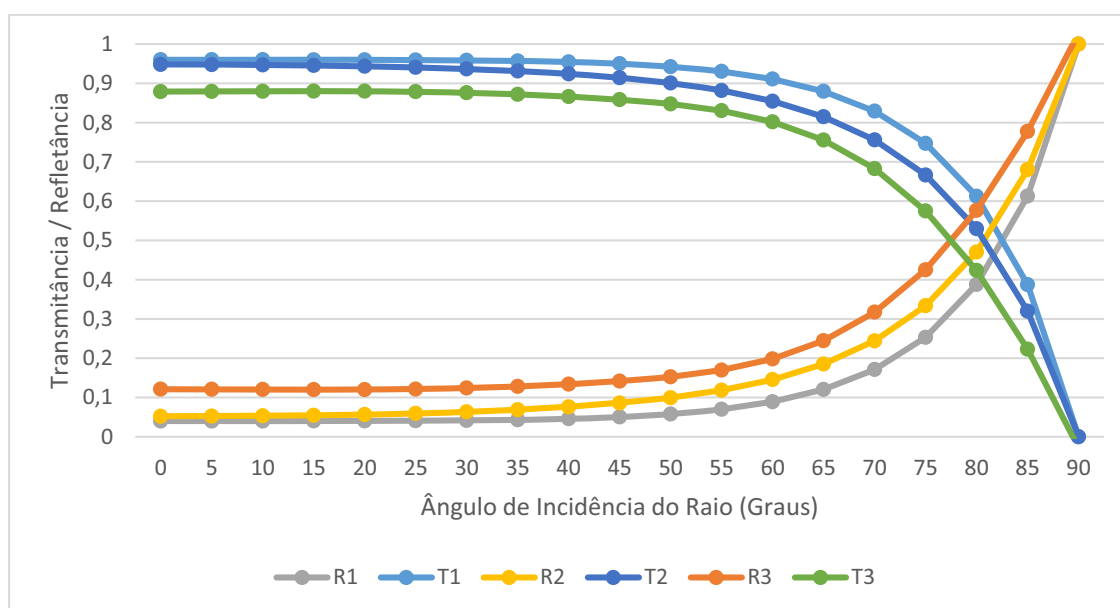


Figura 74 -Transmitância e refletância direcional para os modelos 1, de Edmonds (2000), 2, pelos coeficientes de Fresnel apresentados por Hetch (2002) e 3, pela fórmulação de Tregenza e Sharples (1993)

É possível perceber que os modelos possuem comportamento semelhante, mas que os resultados obtidos por cada um diferem ao longo de todo o domínio das funções. Os resultados obtidos pela fórmulação de Tregenza e Sharples (1993) foram os que atingiram maior diferença entre os demais modelos, principalmente àquele tomado como referência, o que utiliza os coeficientes de Fresnel apresentados por Hetch (2002). O comportamento do modelo de Edmonds (2000) apresentou diferenças menores, continuando afastado do modelo teórico base.

Tal diferença mostra que a adoção dos modelos de Edmonds (1993), ou o de Tregenza e Sharples (1993), na simulação do PCL poderá resultar em diferenças consideráveis. O primeiro, de Edmonds, ainda traz consigo o restante do algoritmo onde são definidas as frações refletida, transmitida e refratada pelo painel utilizando a formulação apresentada, entretanto sua aplicação ao *ray tracing* torna-se complicada em vista da lógica utilizada pelo módulo “*prism2*” do Radiance, a qual o algoritmo se baseia, por combinar os métodos de cálculo do *Ray Tracing* e da radiosidade. O modelo apresentado por Tregenza e Sharples (1993) apresenta-se limitado à aplicação de elementos de vidro com faces paralelas, e sem o efeito de reflexão total interna encontrado no painel PCL e em outros dispositivos avançados, inviabilizando seu uso em tais situações, como afirma também Lowry e Thomas (2010). As contestações fundamentam a escolha do uso dos coeficientes de Fresnel apresentados por Hecht (2002) no algoritmo desenvolvido no TropLux.

A escolha baseia-se também nos estudos desenvolvidos por Andersen et al. (2003), que estudaram se a simulação de elementos prismáticos com a utilização dos métodos Monte Carlo combinado ao *Ray Tracing* resulta em comportamento similar ao medido nos modelos reais utilizando-se da teoria do *bi-directional transmission distribution function* (BTDF). O BTDF utiliza um equipamento semelhante ao gôniofotômetro para medir a transmitância e refletância direcional de elementos (SMITH et al., 2001), e posteriormente produzir curvas semelhantes às apresentadas anteriormente. Os estudos revelaram que a combinação do método Monte Carlo com o *Ray Tracing*, associados aos conceitos de Snell-Descartes e das leis de Fresnel, atingiu resultados muito parecidos com aqueles adquiridos pelo modelo real, mas que em modelos com geometria complexa de planos o custo operacional pode ser alto (id., 2003).